SIEMENS

Voiture automotrice articulée de la Hannoversche Verkehrsbetriebe ÜSTRA AG équipée de hacheurs à thyristors

Type	voiture automotrice articulée réversible
Disposition des essieux	B'2'2'B'
Ecartement de la voie	1435 mm
Largeur de la voiture	2400 mm
Longueur de la voiture	27000 (sans attelage)
Hauteur du plancher	943 mm
Type de courant	courant continu 600 V
Vitesse maximale	80 km/h
Nombre de places	voyageurs assis: 46 voyageurs debout: 104 (0,25 m^2/pers)
Poids à vide	382 kN

La voiture du métro léger est une voiture automotrice articulée réversible à huit essieux pour la circulation en surface et en tunnel. Il est possible d'accoupler 4 voitures articulées pour la circulation en rame. Les voitures sont conçues en conformité avec les recommandations 6.030.1 et 6.325.1 de l'Association allemande des entreprises de transport en commun (VÖV).

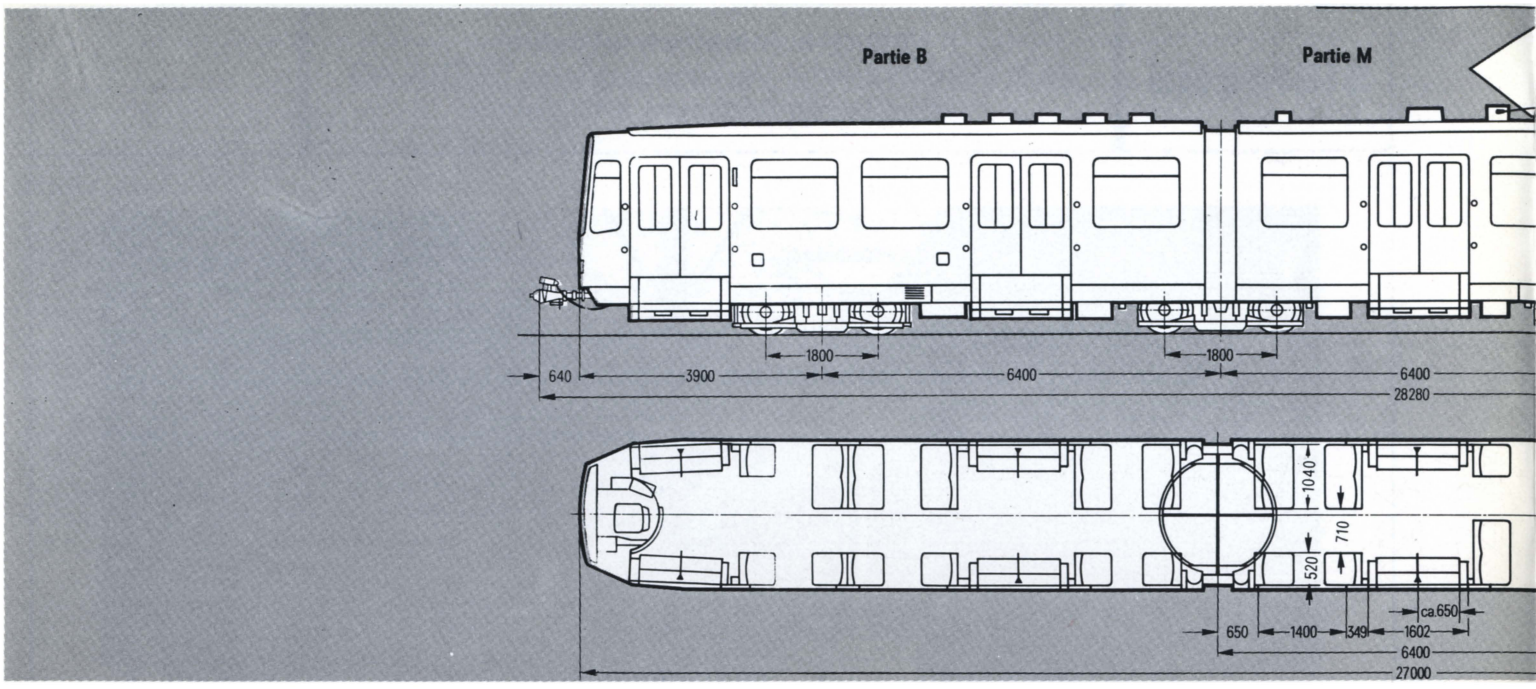
Conception et fourniture de l'équipement électrique	Siemens AG, AEG-Telefunken, Kiepe-Elektrik GmbH en collaboration avec la Hannoversche Verkehrsbetriebe ÜSTRA AG
Conception et fourniture de la partie mécanique	Communauté de travail formée par Waggonfabrik Uerdingen AG, Werk Düsseldorf (DÜWAG) et Linke-Hofmann-Busch GmbH, Salzgitter-Watenstedt

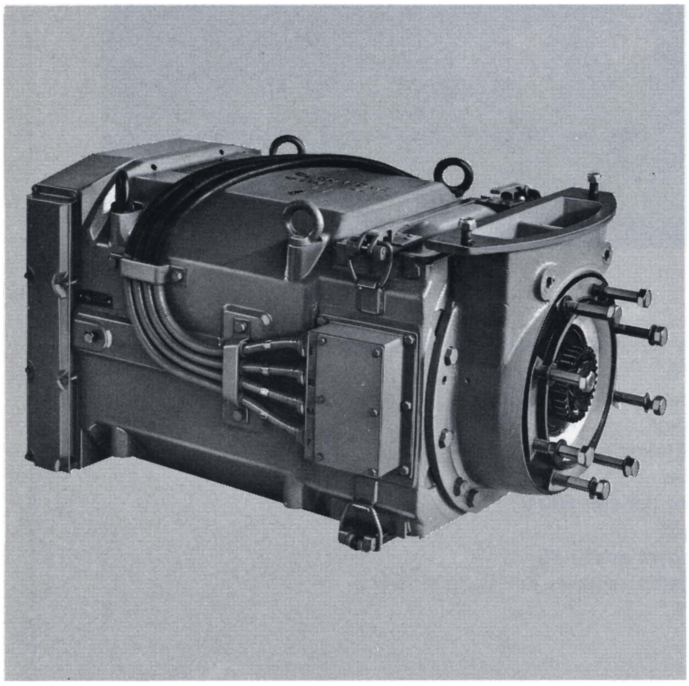
Bibliographie

Ciessow, G.: Steuerungsausrüstungen für Untergrund- und Stadtschnellbahnen mit Bauelementen der Leistungselektronik, Der Stadtverkehr (19ème année) 1974, n° 1, pages 27 à 31

Loderer, P.: Gemischte Nutz- und Widerstandsbremse bei Gleichstromtriebfahrzeugen, Elektrische Bahnen, (44ème année) 1973, n° 8, pages 170 à 174

Waidmann, W.: Fortschritte in der elektronischen Steuerung mit Gleichstromstellern für den Nahverkehr, IFAC-Symposium
Weigl, K. H.: Düsseldorf 1974 (VDI/VDE Gesellschaft f. Mess- und Regelungstechnik)

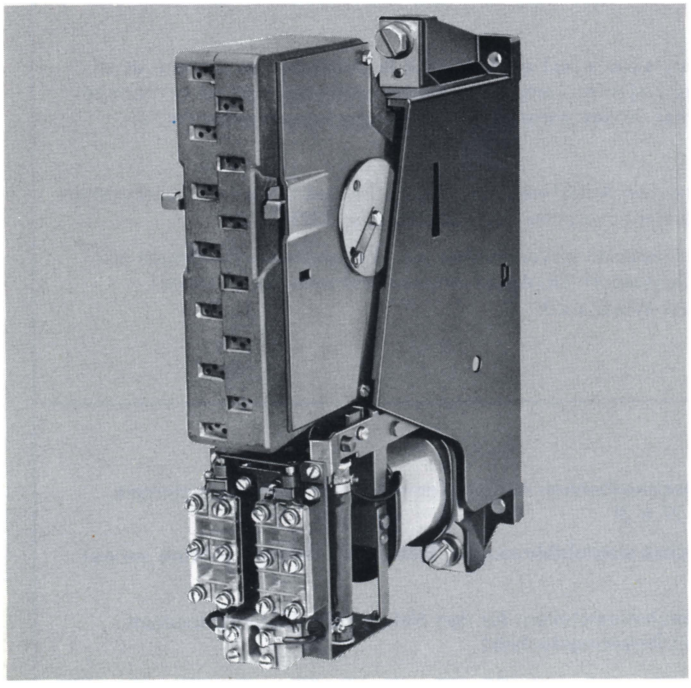




Moteur de traction

Entraînement par 2 moteurs série compensés, tétrapolaires, autoventilés ABS 3320
600 V, 218 kW, 400 A, 1900 tr/min, champ 94 %, classe d'isolation F
Système Rheinstahl-DÜWAG de transmission sur deux essieux à moteur longitudinal
Rapport d'engrenage 5,625:1
Diamètre des bandages neufs/usés: 730/650 mm
Empattement des essieux sur un bogie: 1800 mm

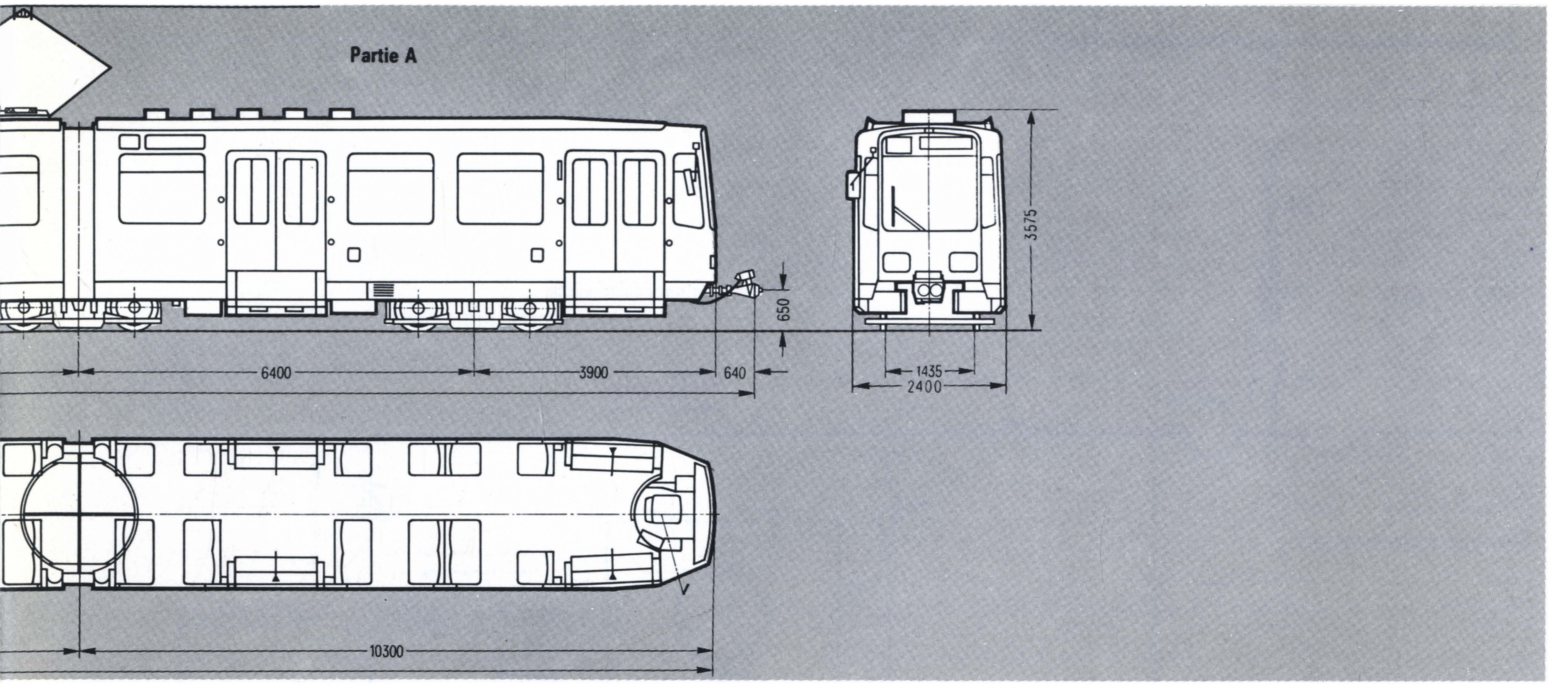
Traction: variation progressive de tension par 2 hacheurs à thyristors
Freinage: indépendant de la ligne de contact, freinage rhéostatique et par récupération combiné, autoexcité (circuits de freinage séparés). Variation progressive de l'effort de freinage par 2 hacheurs à thyristors



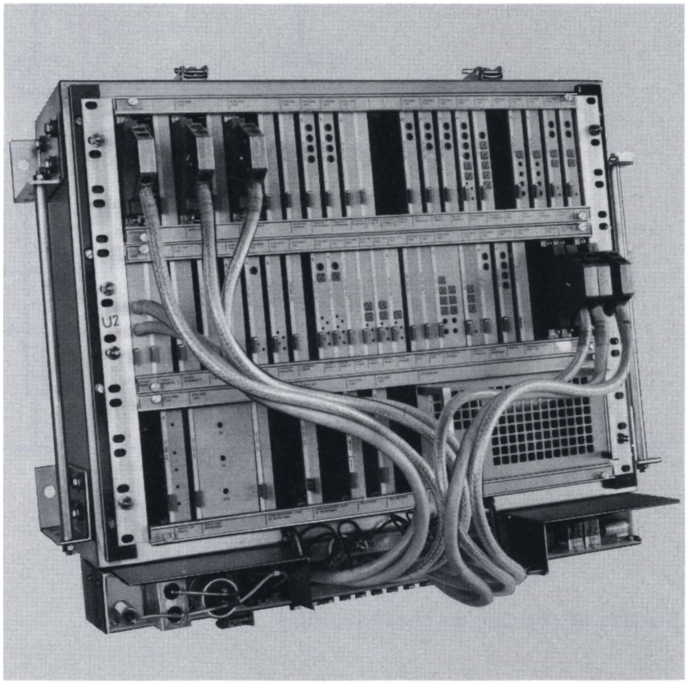
Contacteur type ferroviaire 3TC 74, 750 V, 400 A, à commande électromagnétique

Couplage de traction/freinage par contacteurs 400 A, 3TC 74, avec bobine de soufflage excitée par l'arc.

Freins additionnels: 3 freins à accumulation à ressorts, 8 freins électromagnétiques à patin (600 V, commutable sur 24 V), 1 frein à solénoïde (excité en fonction du courant moteur)



Régulation de traction-freinage et commande électronique réalisés en circuits intégrés et logés dans le bloc de commande de voiture comprenant les groupes fonctionnels suivants:
alimentation
traitement des valeurs de consigne
régulation de courant
logique traction-freinage
étages de puissances pour commande des contacteurs
blocs d'amorçage des thyristors
anti-patinage, anti-enrayage
surveillance du courant de freinage (séparée pour les deux circuits de freinage)
traitement du poids

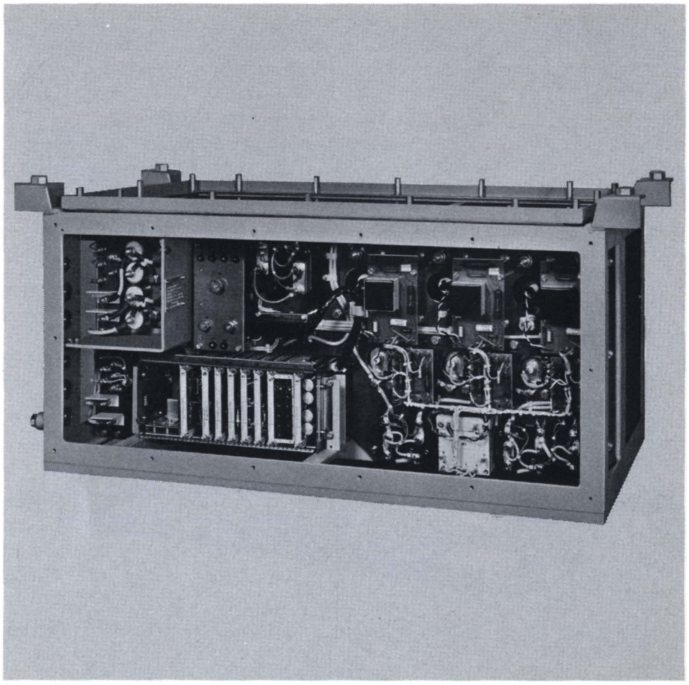


Bloc de commande électronique de voiture

Bloc de commande de rame pour la production des ordres de commande et de la valeur de consigne de rame, avec alimentation

Réseau de bord
24 V=, batterie d'accumulateurs au plomb 153 Ah,
convertisseur statique à thyristors 600 V/24 V=, 200 A.

Alimentation de l'éclairage intérieur à partir du réseau de bord 24 V= par petits convertisseurs continu-alternatifs



Convertisseur statique à thyristors

SIEMENS

Analyse de la compatibilité des automotrices à courant continu équipées de hacheurs avec les équipements de signalisation et de télécommunication

Tiré à part
de «Elektrische Bahnen»
45e année (1974) N° 9
Pages 198 à 204
Auteur: Rudolf Wagner

La question de la compatibilité des convertisseurs statiques avec des installations à courant faible est soulevée de plus en plus. La non linéarité de la caractéristique des redresseurs des convertisseurs est à l'origine, tant à l'entrée, qu'à la sortie du convertisseur, d'harmoniques de courant et de tension susceptibles de perturber les installations avoisinantes. Dans les installations ferroviaires il s'agit de prendre des précautions particulières car les lignes de contact et les circuits de signalisation et de télécommunication ont des tracés parallèles et sont même interconnectés les unes aux autres. Alors qu'en ce qui concerne les installations ferroviaires à courant alternatif, on dispose déjà de résultats d'analyse au sujet des interactions mutuelles, de telles analyses ne viennent que de commencer en traction électrique à courant continu.

Pour cette analyse de compatibilité il est indiqué de partir du hacheur.

Le principe de fonctionnement du hacheur consiste à découper la tension de la source (ligne de contact) qui est alors appliquée sous forme impulsionnelle au ou aux consommateurs (moteurs de traction), de sorte que, suivant la largeur et la fréquence des impulsions, le consommateur se voit appliquer une tension moyenne inférieure ou au plus égale à la tension de la source. En traction électrique, le mode de commande du hacheur le plus avantageux est la commande par variation de la durée de conduction (modification du rapport cyclique) [1 à 4].

Dans ce mode de commande la fréquence de hachage est fixe et la variation de la tension de sortie du hacheur est obtenue en modifiant le rapport de la durée de conduction à la période de hachage, appelé rapport cyclique de conduction (figure 1). Comme le consommateur – en l'occurence le moteur de traction – présente une certaine inductivité, le courant dans le consommateur aura, à l'état quasi-stationnaire, l'allure représentée sur la figure 1.

Pendant la durée de fermeture de l'interrupteur A, le courant du consommateur croît suivant une fonction exponentielle. A l'ouverture de l'interrupteur, l'énergie emmagasinée dans l'inductance du consommateur assure la circulation d'un courant à travers la diode de roue libre, ce courant allant en diminuant. Lorsque la tension appliquée au circuit consommateur se présente sous forme impulsionnelle, il y circule un courant continu ondulé, une sorte de courant mixte.

La source de tension est chargée par des courants pulsés. Mais comme les réseaux de lignes de contact présentent généralement des inductances de l'ordre de quelques mH, le bon fonctionnement d'un hacheur branché sur une ligne de contact exige des dispositions supplémentaires. L'inductance de la ligne de contact réagit notamment à l'établissement et à la coupure du courant en induisant une tension qui s'oppose à la variation de courant; elle s'oppose donc également au fonctionnement du hacheur. L'utilisation de ce convertisseur statique est toutefois possible si l'on limite la circulation des courants pulsés à l'intérieur du montage et si le courant continu côté réseau est relativement bien lissé. Pour cette raison on monte entre le hacheur et la ligne de contact un filtre LC (figure 2). Théoriquement il suffirait de brancher un condensateur en parallèle sur l'entrée, ce condensateur jouant le rôle d'un accumulateur emmagasinant du courant soutiré au réseau pendant la durée de non conduction du hacheur et le restituant ensuite à la charge, mais une étude précise montre qu'un tel lissage purement capacitif exigerait dans la plupart des cas une capacité trop grande.

Le système constitué par le condensateur et l'inductance de la ligne présente des risques de résonance. Les amplitudes des oscillations de courants et tensions sont d'autant

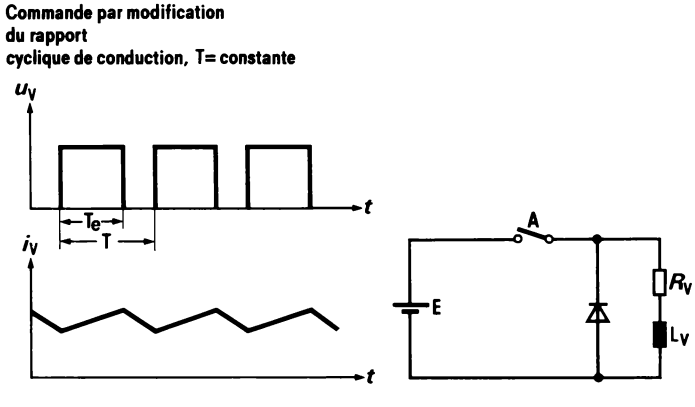


Fig. 1 Principe d'un hacheur commandé par modification du rapport cyclique de conduction

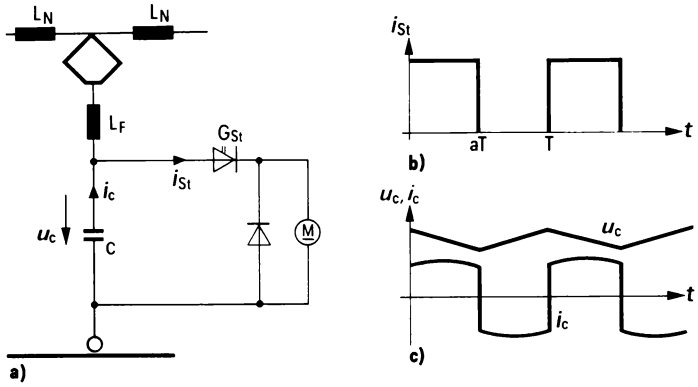


Fig. 2 Hacheur branché sur une ligne de contact

a) Schéma de principe
b) Allure du courant dans le hacheur
c) Allure de la tension et du courant au condensateur

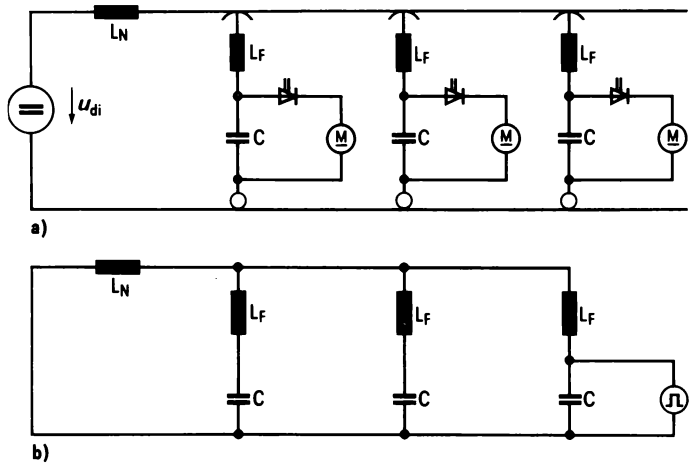


Fig. 3 Schéma équivalent pour le calcul des courants harmoniques dans le réseau

a) Schéma équivalent
b) Schéma équivalent simplifié

plus grandes que la fréquence de résonance du système est proche de la fréquence de hachage. Dans le cas de la résonance, c'est-à-dire en cas d'égalité des deux fréquences pour un rapport cyclique de conduction du hacheur de 50%, l'amplitude des oscillations n'est plus limitée que par la résistance ohmique du circuit. Il faut par conséquent éviter absolument ce cas de la résonance. A cet effet, la capacité du condensateur doit être choisie tellement grande que même pour l'inductance minimale efficace, la fréquence de résonance soit encore largement inférieure à la fréquence de hachage du hacheur. Pour augmenter cette inductance minimale efficace et simultanément pour obtenir un découplage de plusieurs hacheurs, on monte sur le véhicule, en amont du condensateur, une self de lissage supplémentaire. La figure 2 montre les formes du courant et de la tension d'un tel circuit pour un rapport cyclique de conduction du hacheur de 50% et dans des conditions idéalisées, c'est-à-dire pour un courant moteur absolument exempt d'ondulation et sans tenir compte des résistances de ligne.

Si l'on effectue une étude par le calcul de ce circuit idéalisé, il s'avère que contrairement à ce qui est représenté sur la figure, la tension aux bornes du condensateur ne se présente pas sous forme de segments de droite, mais de fonctions sinus [1]. Par conséquent, le courant dans la ligne peut être représenté par des fonctions consinus, ce qui signifie qu'outre le courant continu la ligne de contact véhicule également un courant alternatif susceptible d'influencer d'autres équipements.

Pour la détermination quantitative de la composante alternative du courant de la ligne on utilise le schéma équivalent (figure 3a) d'une ligne de contact à courant continu alimentée par un seul côté. Comme l'influence de la résistance de ligne, des résistances de fuite et de la capacité de ligne est faible, elles peuvent être négligées. La sous-station d'alimentation est remplacée par une source de tension U_{di}, et la réactance de la sous-station est ajoutée à celle de la ligne de contact pour former l'inductance L_N. Comme justement dans les réseaux de traction à courant continu plusieurs motrices fonctionnent en parallèle sur une même ligne de contact, il en est tenu compte dans le schéma équivalent par la représentation de trois filtres LC en parallèle sur la ligne de contact avec les hacheurs correspondants.

Etant donné que pour l'influence sur les installations voisines seuls les courants harmoniques présentent un intérêt, le schéma équivalent peut être simplifié en supprimant la source de tension continue; le hacheur associé au moteur constitue un générateur de courant rectangulaire. La décomposition en série de Fourier d'une impulsion rectangulaire périodique donne:

$$\frac{i_{St}}{I_M} = a + \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\nu} \sin \nu a\pi \cdot \cos \nu \omega t, \qquad (1)$$

où

i_{St} Valeur instantanée du courant du hacheur
I_M Courant moteur absolument constant
a Rapport cyclique de conduction du hacheur
ν Ordre des harmoniques
ω $2\pi f$
f Fréquence de hachage.

La valeur efficace des différentes harmoniques de courant intéressantes pour l'analyse est calculée de la façon suivante:

$$I_{St\nu} = I_M \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{\nu} \sin \nu a\pi. \qquad (2)$$

En supposant que les filtres d'entrée de toutes les motrices fonctionnant sur la ligne ont les mêmes caractéristiques, il suffit d'analyser la réaction d'un seul hacheur (générateur de courant rectangulaire) sur la ligne de contact et de multiplier ensuite le résultat par le nombre n de motrices fonctionnant sur la ligne pour déterminer le cas le plus défavorable.

Les valeurs efficaces des courants harmoniques de la ligne de contact produits par une motrice sont calculées par la relation:

$$I_{N\nu} = I_{St\nu} \frac{1}{\left(\frac{\nu f}{f_0}\right)^2 - 1 + (\nu \cdot \omega)^2 \cdot L_N C \cdot (n-1)}. \qquad (3)$$

Où

$I_{N\nu}$ Valeur efficace du courant harmonique d'ordre ν transmis à la ligne par une motrice

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{(L_F + L_N) C}}$$

L_F Inductance du filtre d'entrée
C Capacité du filtre d'entrée
L_N Inductance de la ligne de contact et de la sous-station
n Nombre des motrices fonctionnant en parallèle sur la section de ligne de contact considérée.

Les équations (2) et (3) montrent que le courant dans la ligne est entaché d'harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence de hachage du hacheur réagissant sur le réseau.

Les courants harmoniques d'ordre 1 à 5 transmis au réseau par un hacheur sont représentés sur la figure 4 en fonction du rapport cyclique de conduction du hacheur.

Comme seules les valeurs maximales présentent de l'intérêt pour une étude de compatibilité, le rapport cyclique de conduction a dans l'équation (2) sera choisi de telle sorte pour le calcul des courants harmoniques de la ligne que l'expression $\sin \nu a\pi = 1$.

Pour permettre de se faire une idée de la valeur des courants dans la ligne, faisons un calcul sur l'exemple suivant: une rame de métro, constituée par trois automotrices doubles, se trouve directement au point d'alimentation. Dans ce cas l'inductance de ligne efficace L_N est la plus faible et vaut 0,3 mH. Chaque automotrice double comporte un filtre d'entrée avec les caractéristiques suivantes $C = 14$ mF et $L_F = 1$ mH; à ce filtre sont branchés deux hacheurs entrelacés fonctionnant à la même fréquence de hachage de 250 Hz mais dont la commande est déphasée de 180°. La fréquence à considérer pour le filtre sera alors du double de la fréquence de hachage soit 500 Hz. Chaque hacheur doit découper un courant moteur de 1000 A. En prenant le cas le plus défavorable où les courants provenant des trois automotrices doubles sont exactement en phase, les équations (2) et (3) donnent pour les courants harmoniques de ligne les valeurs suivantes:

$\nu = 1$	500 Hz	$I_{N1} = 5{,}16$ A
$\nu = 3$	1500 Hz	$I_{N3} = 0{,}19$ A
$\nu = 21$	10500 Hz	$I_{N21} = 0{,}55$ mA.

Mais il est connu qu'à la fréquence nominale de hachage, la tension de sortie d'un hacheur à commutation indirecte – la charge d'un condensateur d'extinction étant inversée une fois au cours de la période de hachage à travers le consommateur – ne peut être complètement annulée. Pour cette raison le démarrage de l'automotrice avec un temps de conduction minimal des thyristors exige que la fréquence de hachage soit réduite pendant une courte durée. La surface tension-temps, qui est une mesure pour l'énergie appliquée aux moteurs de traction par le hacheur, se compose du temps de conduction T_H du thyristor principal, qui est maintenu à sa valeur minimale vt, et de la moitié du temps de conduction $T_L/2$ du thyristor d'extinction.

Si l'on néglige la dépendance du temps de conduction du thyristor d'extinction du courant moteur et si on le considère comme étant constant, la tension appliquée au moteur devient $U_M = (T_M + T_L/2) f U_{di}$, c'est-à-dire qu'elle est fonction de la fréquence de hachage. Pour pouvoir à nouveau se faire une idée chiffrée des courants harmoniques dans la ligne de contact, on admettra de plus que dans l'exemple précédent, le moteur étant à l'arrêt, le courant moteur maximal de 1000 A est atteint à la fréquence nominale de hachage de 250 Hz. Admettons que ce point correspond à un rapport du temps de conduction à la période de hachage (rapport cyclique de conduction du hacheur) de 9%. Ces considérations sont à la base de la représentation sur la figure 5 du rapport cyclique de conduction a et du courant moteur I_M en fonction de la fréquence de hachage.

Ces fonctions ont servi, en s'aidant des équations (2) et (3), à établir pour chaque valeur de la fréquence de hachage les quote-parts des harmoniques de premier, deuxième et troisième ordre dans la ligne de contact, compte tenu de la condition de fonctionnement la plus défavorable, à savoir qu'un seul hacheur est en service sur chaque motrice. Ces courbes sont également représentées sur la figure 5.

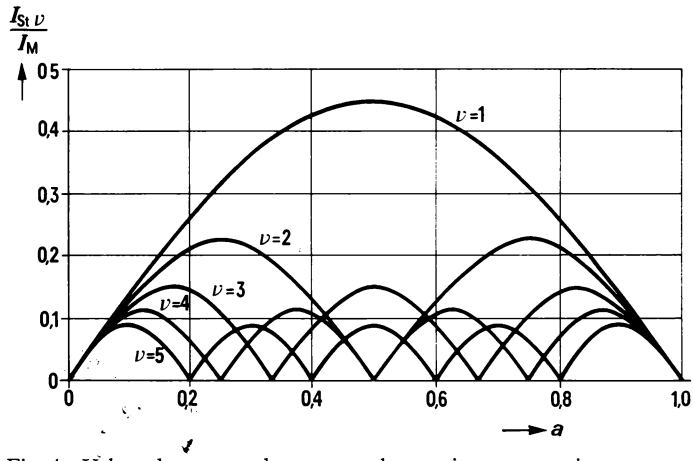


Fig. 4 Valeur du rapport des courants harmoniques, transmis par un hacheur au réseau, au courant moteur en fonction du rapport cyclique de conduction du hacheur a pour les ordres d'harmonique $\nu = 1$ à 5

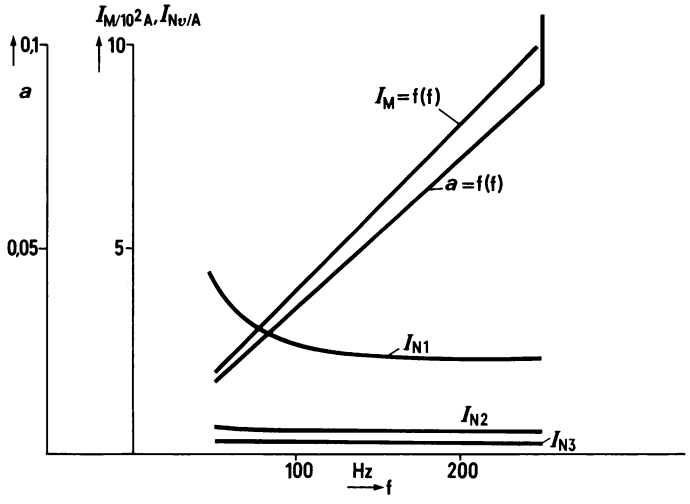


Fig. 5 Courant moteur, rapport cyclique de conduction et courants harmoniques dans la ligne de contact en fonction de la fréquence de hachage lors du démarrage

Il ressort de ce diagramme que, justement pour des fréquences de hachage très basses – et ce, malgré la faible intensité du courant moteur –, le réseau de traction véhicule des courants harmoniques relativement importants.

Outre les courants harmoniques produits par le hacheur en régime quasistationnaire, il convient encore de considérer ceux en provenance des sous-stations. Les réseaux de traction à courant continu sont alimentés à l'heure actuelle presque exclusivement par des ponts de redressement à redresseurs non contrôlés. D'après la théorie idéalisée des convertisseurs à commutation pilotée par le réseau, il apparaît à la sortie de chaque redresseur une tension continue à laquelle se superposent des harmoniques de tension dont les ordres respectifs sont des multiples entiers de l'indice de pulsation du redresseur. La valeur efficace des diverses harmoniques de tension se calcule par la relation suivante:

$$U_{d\nu} = U_{di} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\nu^2 - 1} \qquad (4)$$

où

U_{di} Tension à vide idéale du redresseur

ν pk, ordre de l'harmonique

p Indice de pulsation du redresseur

k 1, 2, 3 ...

Si l'on divise les tensions harmoniques par l'impédance correspondante de l'utilisateur branché au réseau, on obtient les courants harmoniques respectifs.

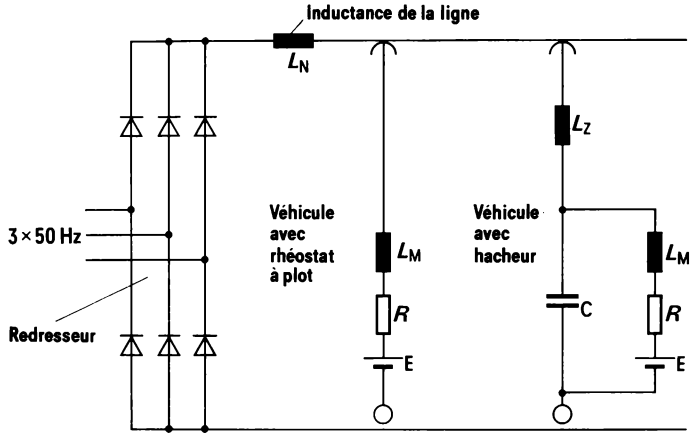


Fig. 6 Schéma équivalent d'un réseau de ligne de contact alimentant un véhicule avec rhéostat à plots et un véhicule équipé d'un hacheur

Dans ce cas également, seul le cas le plus défavorable présente de l'intérêt pour l'appréciation de la compatibilité. Les redresseurs sont réalisés la plupart du temps sous forme de pont triphasé à indice de pulsation 6, de sorte que l'harmonique d'ordre 6 (300 Hz) est la plus forte. L'impédance minimale avec une motrice se présente lorsque les moteurs de traction sont alimentés à la pleine tension du réseau sans l'intermédiaire d'un organe de réglage. Pour une motrice équipée d'un rhéostat conventionnel à plots, le schéma équivalent se réduit au moteur seul (figure 6) qui, à l'état saturé, peut être représenté par une inductance en série avec une résistance et une source de tension dont l'impédance interne est nulle. Si l'on néglige encore la résistance ohmique de la machine, il en résulte pour les quatre moteurs de traction couplés en parallèle d'une automotrice double de métro, un courant à 300 Hz d'environ 10 A. Sur une motrice commandée par un hacheur, ce courant est essentiellement déterminé par le filtre d'entrée.

Comme à 300 Hz l'impédance du condensateur branché en parallèle sur les moteurs de l'automotrice double considérée est presque 10^2 fois plus petite que l'impédance de ces moteurs, ces derniers peuvent être négligés dans le calcul. Avec les valeurs de l'exemple précité, il en résulte pour un véhicule se trouvant directement au point d'alimentation un courant à 300 Hz de 12,6 A. Pour une rame constituée par trois automotrices doubles, le courant harmonique considéré s'élèvera à 25,5 A.

De nombreuses mesures sur les équipements de diverses compagnies de transport ont montré que les valeurs mesurées étaient toujours inférieures aux valeurs théoriques. Les raisons en sont les suivantes: premièrement, toutes les inductances de ligne de contact et de sous-stations, d'une part, ne peuvent pas être déterminées avec précision, et d'autre part, ne sont pas linéaires, deuxièmement, toutes les résistances ohmiques ont été négligées dans le calcul, et troisièmement, la forme d'onde des courants prélevés au filtre d'entrée n'est pas rectangulaire pure mais dissymétrique et trapézoïdale. En se servant du modèle décrit pour calculer les courants harmoniques dans la ligne de contact, on s'est par conséquent placé dans le cas le plus défavorable.

Mais il convient d'ajouter que toutes les mesures révèlent encore la présence d'autres fréquences parmi lesquelles nous ne relèverons que le 100 Hz dont la présence peut être expliquée par la dissymétrie de l'alimentation triphasée de la sous-station.

Voilà déterminées la fréquence et l'amplitude des courants harmoniques se superposant au courant continu de la ligne de contact, il reste donc à voir quelle est leur influence sur le reste de l'équipement.

Signalisation

Pour déceler la circulation de trains on utilise ce que l'on appelle des circuits de voie. Parmi les plus importants on trouve ceux avec des joints isolants sur une file ou sur les deux files de rails (figure 7). Le courant du circuit de voie (courant de signalisation du canton) est injecté à une extrémité de la section de voie à surveiller, tandis, qu'à l'autre extrémité est branché un relais de voie qui, en abscence de train sur le canton, est constamment excité. La présence d'un train sur la section de voie considérée se traduit par un court-circuitage des deux files de rails par les essieux et provoque ainsi la désexcitation du relais et la signalisation de la présence d'un train dans le canton. Alors que le circuit de voie à joints isolants sur une file de rails peut être alimenté aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif – avec la restriction qu'en traction électrique à courant continu, l'alimentation en courant continu ne peut pas être utilisée car le relais n'est pas à même de distinguer le courant de signalisation des courants de traction –, le système à joints isolants sur les deux files de rails ne peut être utilisé qu'en courant alternatif. Le courant de signalisation dans ce dernier cas est notamment injecté par l'intermédiaire du secondaire du transformateur de voie et prélevé à l'autre extrémité de la section de voie sur le secondaire de l'autre transformateur servant à l'alimentation du relais. La prise médiane sur le primaire de ce transformateur permet le passage du courant de traction de retour d'une section de voie à la suivante [5].

Sur les réseaux métropolitains en Allemagne fédérale on utilise des circuits de voie à joints isolants sur une et sur deux files de rails alimentés en 50 Hz. Le relais de voie est généralement un relais type moteur dont le couple d'attraction ne devient efficace que lorsque premièrement les fréquences des courants d'induit et d'excitation sont identiques, deuxièmement, les courants d'induit et d'excitation sont en phase et troisièmement, lorsque le courant de canton est suffisamment élevé.

Si l'on considère le circuit de voie à joints isolants sur deux files de rails, rien ne s'opposerait en principe à ce que la fréquence du courant de signalisation tombe en coïncidence avec une fréquence harmonique du courant de retour si l'on était sûr que le courant de retour se répartit de façon égale sur les deux files de rails. Mais, par suite des différences inévitables de résistivité et des conditions différentes de mise à la terre des deux files de rails, cela n'est pas le cas. Pour cette raison la fréquence du courant de signalisation ne doit pas correspondre à une fréquence harmonique du courant de retour. Voilà donc garantie une très bonne sélectivité du relais de voie aux écarts de fréquence car pour un écart de 3 Hz il ne s'attire déjà plus, mais dans une large plage couvrant environ un écart de fréquence Δf de 15 à 20 Hz, il apparaît des couples oscillatoires qui, s'ils durent relativement longtemps, peuvent conduire à une destruction mécanique du relais. La signalisation exige par conséquent un écart minimal de fréquence de 15 Hz, de sorte que la fréquence de hachage doit être d'au moins 65 Hz avec ce système de signalisation. Si l'on se reporte à la figure 5, il apparaît alors que cette condition impose une limitation à la plage de réglage de la tension du hacheur, limitation dont la conséquence est qu'il n'est plus possible de démarrer avec un courant aussi faible qu'on le veut. Mais si l'on s'assure au niveau de la commande du hacheur que la fréquence de hachage ne tombe jamais en

dessous de la fréquence limite fixée – ce qui peut être contrôlé par un appareil de mesure supplémentaire – le circuit de voie ne subira aucune influence de la part du courant de retour.

Le problème se complique lorsque la fréquence du courant de signalisation est plus élevée, par exemple 125 Hz. Considérant l'écart minimal de frèquence de 15 Hz, la fréquence limite inférieure de hachage est à présent de 140 Hz. En se reportant encore à la figure 5, on constate qu'à 140 Hz le courant moteur est déjà supérieur à la moitié du courant maximal ce qui occasionnerait un à-coup de démarrage inadmissible. Dans ce cas il faut renoncer à une variation continue de la fréquence de hachage au cours de la phase de démarrage. On fera alors fonctionner le hacheur à plusieurs fréquences fixes, situées de part et d'autre de la fréquence de signalisation dont elles seront suffisamment écartées, et en modifiant le rapport cyclique de conduction.

Le circuit de voie à joints isolants sur deux files de rails peut être aussi influencé par d'importantes variations de courant dans les rails. Si, par exemple, pour une cause ou une autre, le transformateur du relais (figure 7) est relié à une seule file de rails – ce qui équivaut à un circuit de voie défectueux – il est magnétisé unilatéralment par le courant de retour. Comme le secondaire du transformateur est accordé sur 50 Hz par un condensateur, chaque di/dt du courant de traction se traduit par une excitation du circuit oscillant. Lorsque ce courant 50 Hz est suffisamment élevé et lorsque sa phase est correcte, le relais de voie s'attire et indique que la voie est libre bien que la section de voie puisse être occupée par un train en cours de démarrage. L'amplitude et la fréquence du courant oscillant, ainsi que la durée de ce phénomène dépendent bien sûr du di/dt du courant de retour et de l'état de magnétisation du transformateur de voie. La courbe de réponse du relais permet de déterminer le di/dt maximal admissible. En prenant des dispositions appropriées au niveau de la commande et de la régulation du hacheur, il est possible de maintenir basses les variations de courant nécessitées par le programme de marche. Les difficultés sont plus grandes dans le cas de variations de courant provoquées par des sauts de tension dans la ligne de contact occasionnés par la charge et la décharge du condensateur de filtrage. A noter que cette dernière influence existe également sur les motrices à commande conventionnelle, les variations de courant étant provoquées dans ce cas par le passage d'un cran sur un autre.

Outre les circuits de voie basse fréquence très largement répandus en Allemagne fédérale à l'heure actuelle, on préfère pour les installations futures utiliser des circuits de voie à joint électrique de séparation. Dans ce système les circuits de voie adjacents ne sont plus limités par des joints isolants, mais par des courts-circuiteurs de files. Si l'on monte à une distance déterminée du court-circuiteur un condensateur (figure 8), celui-ci constitue avec l'inductance des rails un circuit résonnant parallèle qui, accordé sur la fréquence d'émission, présente une impédance tellement grande que l'impédance de fermeture de la section de voie est suffisamment élevée. Côté réception, on réalise un circuit résonnant identique dont le condensateur est connecté au récepteur. Comme la réalisation d'un circuit de voie suivant le schéma de principe de la figure 8 donnerait lieu à une zone non surveillée à proximité du court-circuiteur, ce dernier est réalisé pratiquement en forme de «S» stylisé de manière à obtenir à la place de la zone non surveillée une imbrication des deux circuits de voie adjacents [6, 7].

Les fréquences des courants de signalisation de ces systèmes varient entre 9,5 et 14,5 kHz, les fréquences d'émission pouvant être choisies entre 6 valeurs espacées de 1 kHz. Les différentes fréquences permettent une réception sélective sur des circuits de voie adjacents. La tension d'émission au niveau de la voie est seulement de 2 à 3 V. Dans le cas le plus défavorable une tension d'entrée du récepteur de 0,3 V est suffisante pour provoquer l'attraction du relais de voie. L'intensité du courant de signalisation doit être au moins égale à 50 mA. Avec un rapport signal/bruit de 3, l'intensité de l'harmonique du courant de traction de retour de fréquence égale à la fréquence du signal ne doit pas dépasser 16 mA. Il a déjà été mentionné plus haut que, dans le cas le plus défavorable, l'harmonique de courant à 10,5 kHz de trois automotrices doubles ne dépassait pas 0,55 mA, il n'y a par conséquent aucune influence à craindre.

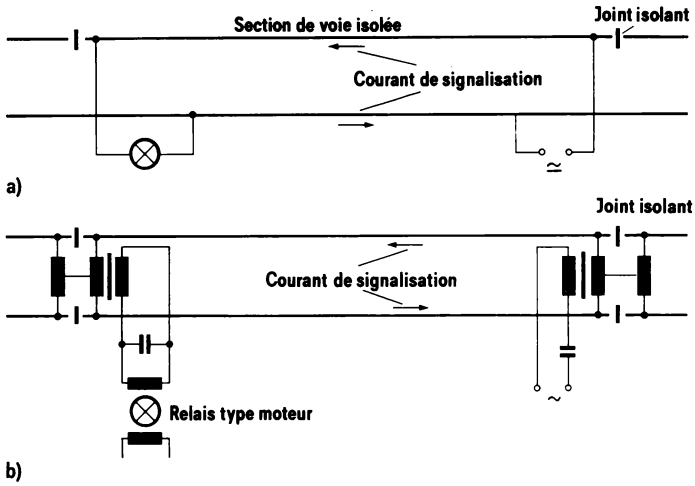


Fig. 7 Schéma de principe de circuits de voie
a) Avec joints isolants sur une seule file de rails
b) Avec joints isolants sur deux files de rails

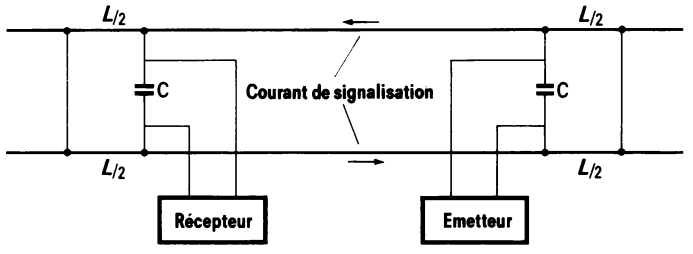


Fig. 8 Circuits de voie à joint électrique de séparation

Télécommunications

Alors qu'en signalisation on s'est borné à ne considérer que certaines fréquences discrètes dans le courant de traction, il y a lieu, en ce qui concerne les lignes de télécommunication, de tenir compte de toute la bande de fréquences acoustiques entre 300 et 3400 Hz. A cet effet les fréquences des courants harmoniques dans les circuits téléphoniques sont pondérées en fréquence suivant la sensibilité de l'oreille humaine et la caractéristique de transmission de l'écouteur de l'interlocuteur (figure 9 voir VDE 0227). La fréquence de référence 800 Hz est associée au facteur de pondération 1; pour la fréquence 300 Hz particulièrement représentée dans les réseaux de traction à courant continu, il vaut 0,295. La tension de bruit pondérée en fréquence ne doit pas dépasser 1 mV dans les réseaux téléphoniques publics, Postes fédérales par exemple, alors que dans les réseaux téléphoniques privés, elle peut atteindre des valeurs supérieures jusqu'à 10 mV. Mais les courants harmoniques peuvent non seulement donner lieu à des tensions de bruit, mais encore perturber le fonctionnement

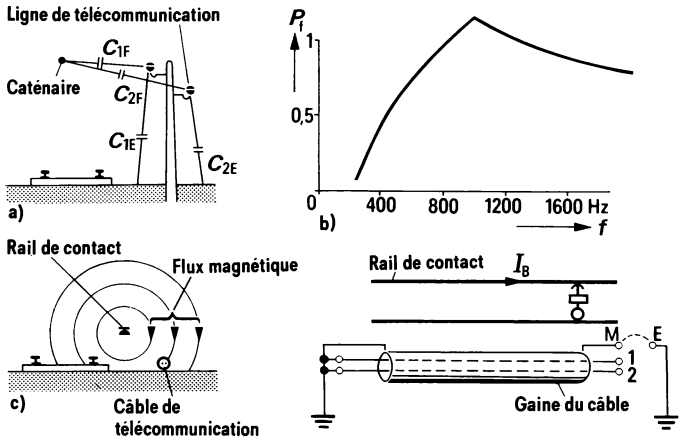


Fig. 9 Influences parasites possibles sur les lignes de télécommunication
a) Couplage capacitif
b) Courbe de pondération en fréquence des tensions parasites
c) Couplage inductif

des circuits de signalisation des installations téléphoniques (erreur de sélection d'appel, erreur de numérotation et déclenchement intempestif).

Des variations brusques du courant de traction occasionnées par des phénomènes non stationnaires ou par des courants harmoniques peuvent se répercuter sur des lignes voisines par couplage capacitif et inductif. Il apparaîtra un couplage capacitif lorsque par exemple deux lignes aériennes de télécommunications sont disposées asymétriquement par rapport à une caténaire de sorte que les capacités parasites de couplage et de terre sont différentes (figure 9a). Par suite de la répartition capacitive différente de la tension, il apparaîtra des différences de tension entre les deux lignes qui se traduisent par une tension parasite. Il est possible de pallier à ce couplage capacitif en procédant à une transposition régulière des lignes. En raison de la mise à la terre de la gaine métallique ou de l'écran, les câbles ne sont généralement pas le siège de tensions parasites induites par couplage capacitif.

Le couplage inductif touche dans la même mesure les lignes aériennes et les câbles. Chaque variation de courant est accompagnée par une variation du flux magnétique qui induit des tensions dans les lignes voisines. Dans la figure 9c on a représenté un câble à deux conducteurs isolés par rapport à la terre, posé parallèlement aux rails. Le champ magnétique variable donne naissance, entre chaque conducteur et la terre, à une f.é.m. longitudinale. Par suite de la différence des capacités parasites de couplage et des résistances de fuite, il apparaît entre les deux conducteurs des différences de potentiels dont la valeur dépend de la f.é.m. longitudinale et qui se traduisent par une tension de bruit ou une tension parasite non pondérée en fréquence donnant lieu aux perturbations déjà mentionnées. La dissymétrie des appareils raccordés peut encore amplifier ces tensions.

Si en première approximation, on néglige les phénomènes non stationnaires ayant pour siège le rail de contact, la tension de bruit peut être calculée de la façon suivante à partir des courants harmoniques polluant le courant de traction.

$$E = \omega \cdot M \cdot l \cdot I_{N\nu} \cdot P_f \sqrt{k^2 + g^2}, \qquad (5)$$

où

ω Pulsation du courant harmonique présent dans le courant de traction

M Coefficient d'induction mutuelle par km

l Longueur sur laquelle le câble longe le rail de contact

$I_{N\nu}$ Valeur efficace du courant harmonique d'ordre ν présent dans le courant de traction

P_f Facteur de pondération en fréquence

k Coefficient de sensibilité de la paire de conducteurs influencés; il tient compte du facteur de dissymétrie du câble et peut être choisi dans le cas présent égal à 0,001

g Facteur de dissymétrie des appareils raccordés; lorsque le câble est fermé par des transformateurs d'adaptation il peut être choisi égal à 0,001 et en cas de raccordement direct des appareils sans l'entremise de transformateurs, égal à 0,01.

Comme il a déjà été dit plus haut, les courants harmoniques dans la ligne de contact sont engendrés d'une part par le hacheur et d'autre part, par le redresseur de la sous-station. Si en se basant sur l'exemple précédent, on calcule pour chacune des sources de courants harmoniques la somme géométrique, pondérée en fréquence, des tensions harmoniques, on trouve, pour $k = g = 0{,}001$ et $M \cdot l = 1$ mH, les valeurs suivantes:

source: redresseur	25,8 mV
source: hacheur	15,3 mV
somme géométrique (tension de bruit)	30,0 mV

Mais la somme géométrique, pondérée en fréquence, pour toutes les fréquences parasites ne doit pas excéder 1 mV.

Si à présent l'autre extrémité du câble de la figure 9c est également mise à la terre, la gaine du câble est traversée par un courant dont le champ magnétique s'oppose à celui du courant de traction et entraîne par conséquent une réduction de la f.é.m. longitudinale. Cet effet de réduction introduit par la gaine du câble est d'autant plus fort que la résistance de la gaine est plus faible et que la mise à la terre du câble est meilleure. En ajoutant sur le câble une armure en feuillard d'acier, l'effet du champ magnétique du courant de traction subit une réduction supplémentaire.

En matière de câbles de télécommunication, l'effet de réduction est caractérisé par un facteur dit de réduction, défini par le rapport de la f.é.m. longitudinale par rapport à la terre induite en présence d'une enveloppe métallique à la f.é.m. du conducteur par rapport à la terre en absence de l'enveloppe métallique. Le facteur de réduction dépend de la construction du câble et des fréquences parasites. Dans l'exemple choisi, il vaut:

0,4 pour des câbles à gaine en plomb;
0,1 pour des câbles à gaine en aluminium;
0,05 pour des câbles à gaine en aluminium avec armure en feuillard d'acier.

Les rails de la voie ont un effet similaire à celui de la gaine métallique du câble. Avec un éclissage de rails bon conducteur de l'électricité, le facteur de réduction des rails est de 0,5. En assurant une bonne isolation des rails par rapport à la terre (métros) l'effet de réduction peut encore être amélioré de 50%.

En multipliant les tensions de bruit trouvées précédemment par les facteurs de réduction correspondant à un câble à gaine en aluminium avec armure en feuillard d'acier et à une bonne isolation des rails, on trouve les valeurs suivantes:

source: redresseur	0,32 mV
source: hacheur	0,19 mV
somme géométrique	0,37 mV

Il en résulte que l'influence du hacheur sur la tension de bruit est faible et on peut en tirer la conclusion suivante: si la self L_F du filtre d'entrée, qui équivaut dans ce cas à l'inductance équivalente de tous les moteurs d'une automotrice double, est correctement dimensionnée, le hacheur ne donne pas lieu à une tension de bruit sensiblement plus élevée à celle produite par des motrices à commande classique. A l'heure qu'il est, ces résultats théoriques sont complétés par une série de mesures sur divers réseaux de métros.

Résumé

En harmonisant correctement les équipements, il est possible d'éviter les perturbations que peuvent apporter les hacheurs aux circuits de signalisation et de télécommunication. Pour la sécurité du mouvement sur les voies, les circuits de voie à joints électriques de séparation semblent les mieux appropriés, le courant parasite étant plus de dix fois plus petit au courant de signalisation. En ce qui concerne la pose de câbles de télécommunication, il faut appliquer les mêmes règles que pour les équipements classiques car il est probable que la tension de bruit occasionnée par les véhicules à hacheur ne sera supérieure que de 20% à celle produite par les véhicules à commande classique.

Bibliographie

[1] Heintze, K.; Wagner, R.: Elektronischer Gleichstromsteller zur Geschwindigkeitssteuerung von aus Fahrleitungen gespeisten Gleichstrom-Triebfahrzeugen. ETZ A, Bl. 87 (1966) pages 165 à 170

[2] Forstbauer, W.; Otzdorf, H.; Prottengeier, E.: Über den Einsatz von Gleichstromstellern zur Geschwindigkeitssteuerung von Nahverkehrsfahrzeugen. Elektrische Bahnen 40 (1969) H. 7, pages 148 à 155, 16B

[3] Wagner, R.: Die Strom- und Spannungsverhältnisse beim Gleichstromsteller. Siemens-Z. 69, pages 458 à 464

[4] Wagner, R.: Gleichstromsteller für elektrische Triebfahrzeuge. Siemens-Z. 71, Beiheft Bahntechnik, pages 143 à 147

[5] Meyer, H.-U.: Der Achskurzschluß bei Gleisstromkreisen mit Wechselspannung. Signal und Draht (1957) H. 11, pages 159 à 176

[6] Dickschen, A.; Frank, W.: Tonfrequenz-Gleisstromkreis mit elektrischem Trennstoß. Signal und Draht 61 (1969) H. 12, pages 196 à 205

[7] Dickschen, A.: Tonfrequenz-Gleisstromkreise zum Überwachen von Gleisabschnitten. Siemens-Z. 71, Beiheft Bahntechnik, pages 161 à 164

SIEMENS

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT

N° de réf. E 418/1401-102
Imprimé en Allemagne
à l'imprimerie Passavia Passau
141081 SD 3751.

TP 935-82.2

Extrait de ACEC-REVUE N° 3-4 / 1976

LES EQUIPEMENTS A HACHEURS DES VOITURES DU METRO DE BRUXELLES

J. GALLOY

A MEMBER OF THE WESTINGHOUSE ELECTRIC GROUP

LES ÉQUIPEMENTS A HACHEURS DES VOITURES DU MÉTRO DE BRUXELLES

INTRODUCTION

L'encombrement croissant des villes par les véhicules individuels, leur pollution par les gaz d'échappement et le bruit, l'augmentation du nombre d'accidents enfin, ont dans tous les pays sensibilisé l'opinion au problème de la circulation urbaine.

Par ailleurs, la récente crise du pétrole a rappelé à ceux qui les croyaient inépuisables que les sources d'énergie conventionnelles devaient être économisées.

La réponse à ces préoccupations se retrouve partout identique, aussi bien sur le vieux que sur le nouveau continent : *les transports en commun, en site propre, à propulsion électrique.*

C'est ainsi que le nombre de métros ou de semi-métros dont la construction ou l'extension est décidée n'a jamais été aussi grand; c'est ainsi également que des pays qui, comme la France, avaient supprimé leurs tramways, ont décidé de les réintroduire.

En Belgique, le tramway a toujours gardé une place prépondérante dans les transports en commun des grandes villes. Sa mise en site propre et son utilisation dans les tunnels du futur métro au fur et à mesure de leur exécution valut à la Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles (STIB) d'innover en créant le « pré-métro » dont le succès auprès du public et de nombreuses municipalités belges et étrangères fut immédiat [1].*

Mais, tout en exploitant avec des tramways les ouvrages d'art ainsi créés, la STIB élaborait les cahiers des charges du futur métro. Elle passait en 1970 à l'industrie belge une commande d'étude suivie, fin 1972, par la commande de la première tranche de quarante-cinq rames doubles.

La construction des parties mécaniques (caisses et bogies) fut attribuée à la S.A. Brugeoise et Nivelles (BN) et à la S.A. Constructions Ferroviaires du Centre (CFC), tandis qu'étaient confiées aux Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi l'étude et la réalisation des équipements électriques.

Les pages qui suivent exposent les solutions que ACEC a développées dans le cadre de cette commande.

Ces solutions sont le résultat de l'expérience acquise par ACEC dans le domaine des transports depuis plusieurs décennies. Elles sont, à plusieurs égards, originales et ont fait l'objet de nombreux brevets.

* Voir la bibliographie en fin d'article.

Fig. 1. - Rame de métro à la station « Delta ».

I. LIGNES DIRECTRICES DE LA CONCEPTION DES VOITURES

Données à prendre en considération

La conception des voitures du métro de Bruxelles et plus particulièrement celle des équipements électriques a été déterminée directement par les multiples souhaits, impositions et contraintes à prendre en considération.

Souhaits des voyageurs

Sous peine de faillir à sa mission, un moyen de transport public doit être adapté aux utilisateurs qui posent un certain nombre de souhaits légitimes :

— ne pas marcher trop longtemps pour trouver une station de métro;

— être transporté rapidement.

Le premier souhait implique, particulièrement au centre des villes, des intervalles relativement courts entre les stations : l'interstation moyenne sur la ligne n° 1 du métro de Bruxelles est de 575 m.

Le second souhait sous-entend en fait deux conditions : une attente réduite (c'est-à-dire un intervalle court entre trains) et une vitesse commerciale convenable; ces deux objectifs conduisent l'un comme l'autre à des taux importants d'accélération et de freinage.

Notons en passant qu'à cet égard la vitesse de pointe ne constitue qu'un paramètre tout à fait accessoire.

— trouver dans les voitures de métro un « honnête » niveau de confort. Ceci suppose (outre un aménagement intérieur adéquat, la qualité du roulement et un niveau de bruit suffisamment bas) la réalisation d'un démarrage et d'un freinage sans secousses.

Il importe donc d'éviter les variations brusques d'effort moteur, d'autant plus désagréables que les valeurs des accélérations et décélérations à réaliser sont élevées.

— ne pas avoir à souffrir de retards importants.

Cela signifie que le moyen de transport doit être régulier et fiable. Comme, en métro, l'arrêt d'un seul train paralyse l'ensemble d'une ligne, il est indispensable que le matériel roulant ne tombe pratiquement jamais en panne complète.

Impositions de l'exploitant

Bien entendu, l'exploitant doit satisfaire aux désirs légitimes de sa clientèle; il doit aussi veiller à l'économie de fonctionnement de son système de transport. Il demande donc :

— comme le voyageur, un matériel à vitesse commerciale élevée : il peut, de la sorte, réduire l'importance de son parc de voitures;

— un matériel exigeant peu d'entretien;

— un matériel consommant le minimum d'énergie électrique : outre les économies directes qui en résultent, ceci permet de réduire les installations coûteuses de ventilation des tunnels et, en outre, d'installer une moindre puissance de transformation, de redressement et de distribution dans les sous-stations et le réseau d'alimentation;

— des voitures « faciles à conduire », (conduite « par vitesse imposée ») et se prêtant même, pour ménager l'avenir, à l'adaptation aisée d'un pilotage automatique intégral.

Données topographiques

La ville de Bruxelles présente un relief exceptionnellement accidenté, lié notamment à sa situation dans la vallée de la Senne. Il en est résulté tout naturellement, dans le tracé des lignes de métro, des rampes et pentes importantes, ainsi que des rayons de courbure réduits en maints endroits.

C'est particulièrement le cas pour la ligne n° 1, dite axe Est-Ouest, où la dénivellation à franchir atteint 45 m sur 1,4 km (de la station « de Brouckère » à la station « Arts-Loi ») et où, sur certains tronçons, on observe des déclivités allant jusque 65 ‰ et des rayons de courbure aussi faibles que 100 m.

Pour illustrer ce qui précède, nous donnons à la figure 2 le profil en long, très simplifié, de la ligne n° 1 entre les stations « de Brouckère » et « Schuman ».

Solutions

Le problème étant posé dans les termes que l'on vient de voir, les solutions à adopter se dégageaient tout naturellement.

L'imposition *accélérations et décéléra-*

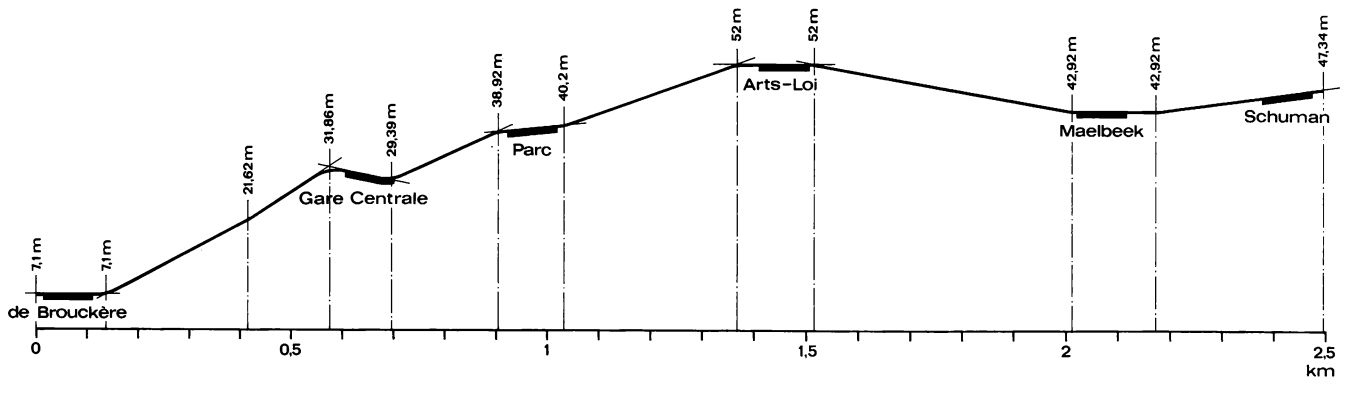


Fig. 2. - Profil de la ligne n° 1 entre les stations « de Brouckère » et « Schuman ».

tions élevées, conjuguée avec la contrainte *relief accidenté des lignes* a conduit aux choix suivants :

— construction légère, faisant largement appel à l'aluminium;

— motorisation intégrale de tous les essieux, c'est-à-dire adhérence totale;

— équipement de propulsion particulièrement puissant, capable de conférer aux voitures les accélérations et décélérations maximales compatibles avec le confort des voyageurs;

— réglage à la charge, évitant une sollicitation excessive de l'adhérence quand les voitures sont vides;

— freins mécaniques à hautes performances comportant notamment, pour le freinage de sécurité, des patins électromagnétiques sur rails.

Signalons en passant que le choix de la vitesse de pointe a fait l'objet d'une étude approfondie, en conclusion de laquelle il est apparu que, compte tenu de l'interstation moyenne relativement courte, une vitesse de pointe supérieure à 70 km/h n'apportait pratiquement plus aucun gain de vitesse commerciale. En conséquence il a été décidé de limiter à 72 km/h la vitesse maximale de service, la vitesse maximale de sécurité étant fixée à 80 km/h.

Pour obtenir la *fiabilité élevée* indispensable à l'exploitation métro, les équipements de motorisation et de freinage ont été volontairement dédoublés sur chaque unité de traction.

En cas d'incapacité accidentelle d'un « demi-équipement », il est ainsi possible de poursuivre l'exploitation — ou, en tout cas, de dégager la ligne — avec le « demi-équipement » restant.

Enfin, pour la réalisation complète de toutes les autres *exigences, contraintes* ou simples *souhaits,* le client a choisi, pour l'équipement de motorisation des voitures, un hacheur à thyristors du type le plus moderne.

Ceci résulte directement des multiples avantages inhérents aux équipements à hacheurs. Ayant déjà traité ce sujet de façon détaillée [2], nous nous limiterons ici à un bref rappel :

— douceur inégalée des démarrages et des freinages, du fait de l'élimination complète des variations brusques d'effort;

— hautes performances résultant de l'utilisation possible des valeurs élevées d'accélération et de décélération;

— gain considérable d'énergie, découlant tant de l'élimination des pertes rhéostatiques au démarrage que du freinage par récupération;

— corollairement au gain d'énergie, réduction de la puissance à installer dans le réseau d'alimentation et diminution des frais à consentir pour la ventilation des tunnels;

— réduction drastique des frais d'entretien qui constituent, comme chacun sait, un poste très important dans les frais d'exploitation;

— aptitude « naturelle » à l'automatisation vers laquelle on se dirige inévitablement pour pallier l'augmentation accélérée des coûts de main-d'œuvre.

II. CARACTERISTIQUES GENERALES DES VOITURES

Après cet exposé des idées de base, il est indispensable de mentionner les caractéristiques générales des voitures résultant des spécifications du client. Dans une très large mesure en effet, ces caractéristiques ont servi à déterminer ou à préciser la spécification des équipements électriques de traction.

Constitution des trains

L'élément de base de l'exploitation est *l'unité de traction* ou *rame,* formée de deux voitures accouplées en permanence et munies chacune d'un poste de conduite.

Il est prévu d'accoupler entre elles jusqu'à trois unités de traction, pour former des trains comportant un maximum de 6 voitures.

La figure 3 donne les vues schématiques d'une unité de traction, avec l'indication des cotes principales.

L'ossature de la *caisse* est en alliage léger, avec les faces avant et arrière en résine polyester renforcée de fibres de verre.

Construction des bogies

Les *bogies,* du type « monomoteur », sont représentés à la figure 4.

Ils comportent notamment :

— deux étages de suspension, l'un primaire réalisé par des éléments annulaires en caoutchouc, l'autre

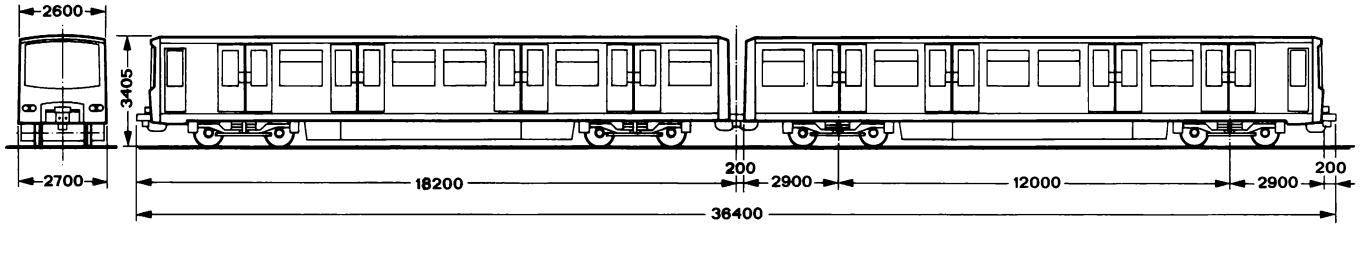


Fig. 3. - Vues schématiques d'une unité de traction (420 places, dont 80 assises et 340 debout).

secondaire du type pneumatique avec valve de nivellement;

— deux réducteurs à deux étages (couple conique et couple cylindrique);

— le moteur disposé parallèlement à l'axe longitudinal de la voiture, entièrement suspendu et auto-ventilé;

— des roues rigides à bandages rapportés;

— deux frotteurs de prise de courant pour 3e rail, actionnés à distance par air comprimé;

— deux freins à disques sur essieu, actionnés par des cylindres à commande double (pneumatique et hydraulique);

— des sabots nettoyeurs de bandages pour améliorer l'adhérence;

— deux patins électromagnétiques sur rails;

— des sablières à commande électro-pneumatique.

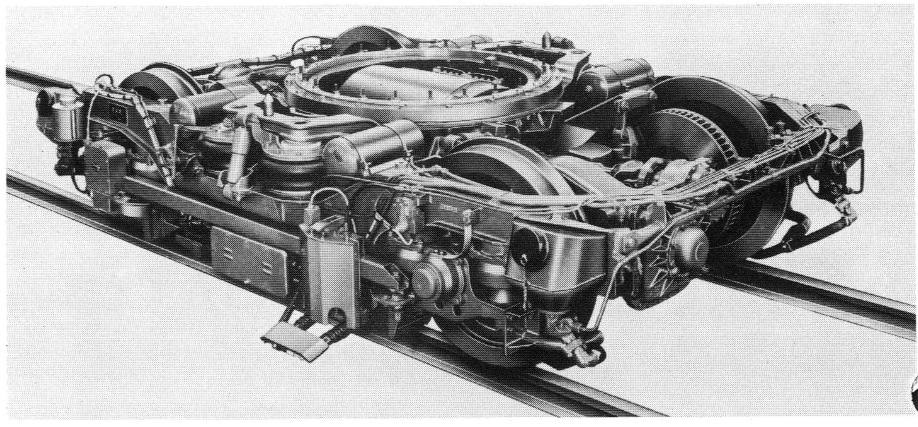


Fig. 4. - Bogie « monomoteur ». Photo S.P.R.L. Bauters, Bruxelles, aimablement communiquée par les Constructions Ferroviaires du Centre, Familleureux.

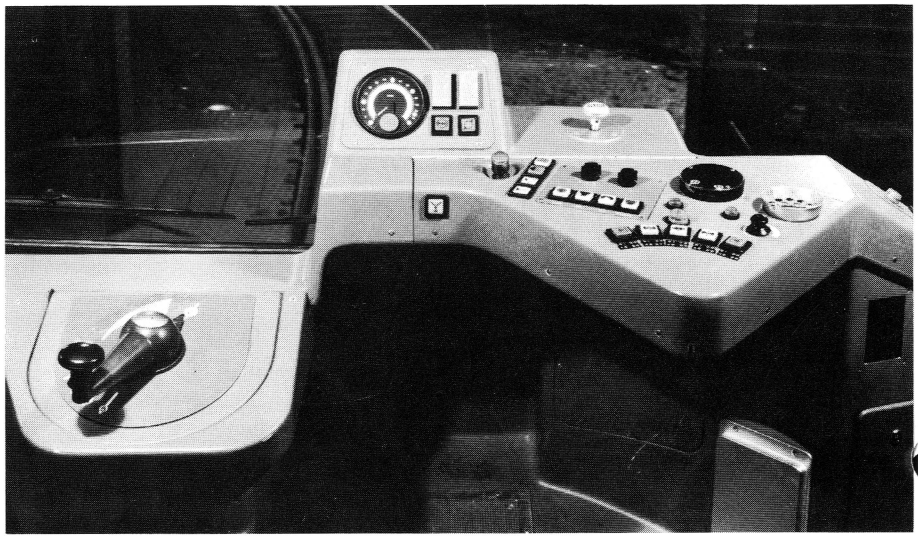


Fig. 5. - Poste de conduite.

Conduite de la voiture (fig. 5)

La conduite de la voiture s'effectue au moyen d'un manipulateur unique dans lequel sont concentrées toutes les commandes — électriques et pneumatiques — de traction, de freinage et d'inversion du sens de marche.

L'arbre principal de ce manipulateur est actionné par une manette dans la course de laquelle on distingue :

— la position de freinage d'urgence;

— la plage de freinage de service;

— la position dite « dérive »;

— les 5 positions de traction.

Le conducteur a le choix entre deux modes de conduite : *affichage d'effort* ou *affichage de vitesse* (conduite par vitesse imposée). Nous ne parlerons que de ce dernier qui est le mode normal d'exploitation.

• Le conducteur commande la vitesse du train en plaçant la manette du manipulateur sur une des 5 positions de traction auxquelles sont associés 5 niveaux discrets de vitesse : 25, 40, 50, 60 et 72 km/h.

Le système ACEC utilisé a ceci de particulier, que l'effort de traction développé dépend du niveau de vitesse demandé et est d'autant plus important que la vitesse de consigne est élevée. Il en résulte une conduite extrêmement « naturelle » et un confort accru pour les voyageurs.

• A la position *dérive,* correspond une limitation de vitesse à une valeur relativement basse, *mais non nulle* (de l'ordre de 25 km/h).

Dès que la vitesse de la rame est descendue en dessous de ce niveau, tout effort de freinage s'annule et le conducteur reprend sa liberté de manœuvre pour atteindre le point d'arrêt imposé.

• Le déplacement de la manette sur les positions de freinage entraîne, par priorité sur le dispositif de vitesse imposée, l'application des freins comme indiqué au paragraphe suivant.

Freins

Le *freinage de service* est obtenu par le frein électrique, du type mixte (récupération et rhéostatique). Quand, à une vitesse inférieure à 15 km/h ou pour une raison accidentelle quelconque, le freinage électrique disparaît, il lui est substitué automatiquement le freinage à disques sur essieux, à commande électropneumatique.

Le freinage de service est commandé par la manivelle du manipulateur, la décélération demandée étant déterminée par le déplacement angulaire de cette manette.

Le *freinage de sécurité* est obtenu par 2 freins utilisés simultanément :

— le frein à disques commandé avec

l'effort maximal par voie pneumatique pure;

— le frein par patins électromagnétiques sur rails.

Ce freinage est mis en service soit lorsque la manette du manipulateur est placée sur la position « urgence », soit par l'actionnement d'un dispositif spécial de sécurité dénommé « coup de poing », soit par le fonctionnement du dispositif d'homme-mort incorporé à la manette du manipulateur, soit enfin par le dispositif de commande automatique du freinage lié à la signalisation.

Le *freinage de stationnement* est réalisé par les disques sur essieux actionnés par voie hydraulique; la commande du serrage et du desserrage se fait à partir de boutons-poussoirs situés dans les postes de conduite.

Alimentation des circuits auxiliaires BT

Chaque unité de traction comporte un groupe convertisseur rotatif de 15 kW utiles, constitué d'un moteur d'entraînement à 750 Vcc et d'un alternateur triphasé 100 Hz à deux enroulements de sortie.

La *première* sortie triphasée (9 kW) sert à former la tension de 110 V continu utilisée pour charger la batterie et alimenter les circuits suivants :

— commandes de train, asservissements et régulations de traction et de freinage;

— appareils de freinage mécanique : pneumatique, hydraulique, patins sur rails;

— la plupart des auxiliaires et l'éclairage de secours.

La *seconde* sortie triphasée (6 kW) alimente directement les circuits 220 V alternatif, tels que l'éclairage fluorescent et la prémagnétisation des moteurs en freinage, et sert à former les tensions redressées 24 Vcc (pour les équipements de radio et d'interphonie, les essuie-glaces, les feux extérieurs des voitures, les lampes-témoins du poste de conduite, etc...).

Avec une capacité de 58 Ah, la batterie d'accumulateurs du type alcalin assure à la voiture une autonomie de fonctionnement d'une demi-heure en cas de panne du groupe convertisseur.

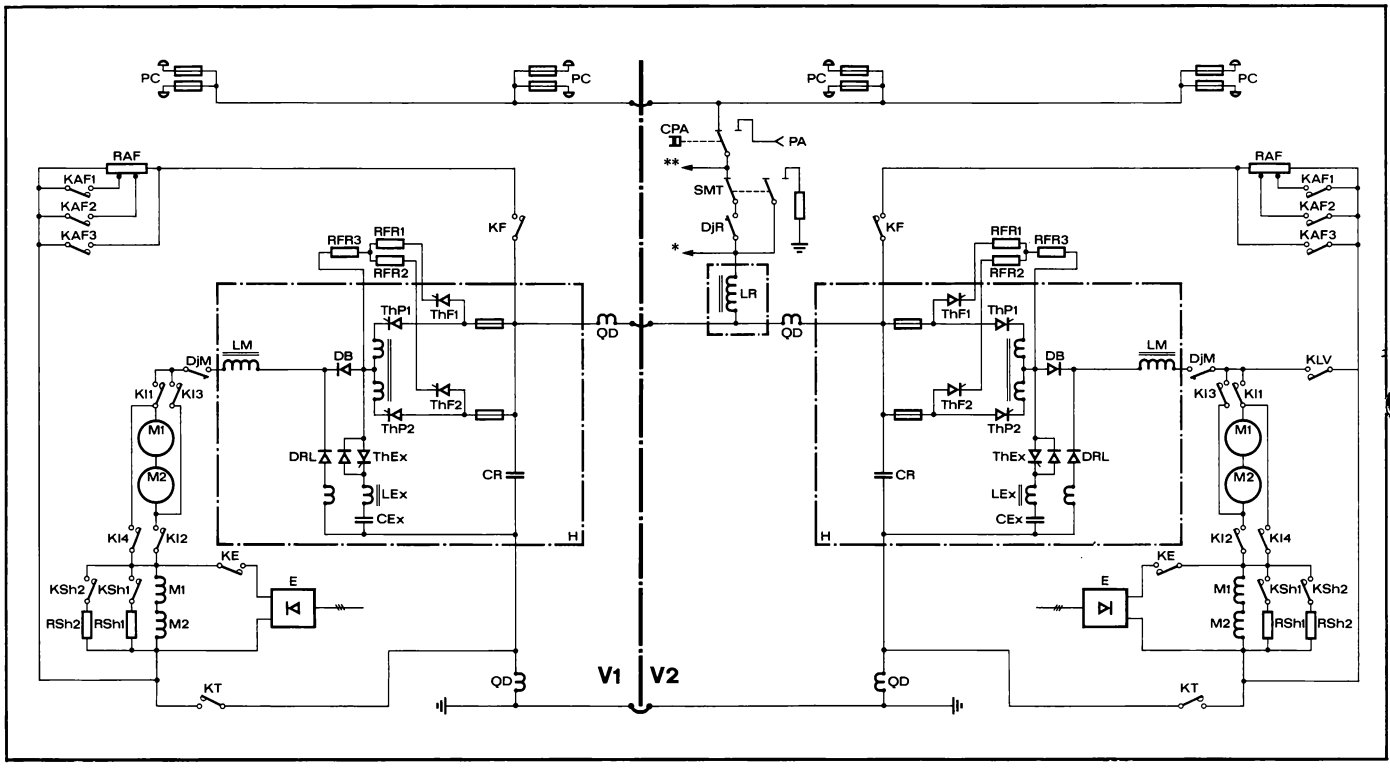
Données numériques

Les données numériques intervenant directement dans la définition de l'équipement de traction sont reprises au tableau I.

TABLEAU I

Ecartement de la voie	1 435 mm
Tare d'une unité de traction	61,0 t
Masses en rotation, par unité de traction	11,4 t
Charge utile par unité de traction (420 voyageurs)	29,4 t
Vitesse maximale de service	72 km/h
Vitesse maximale de sécurité	80 km/h
Diamètre des roues :	
— neuves	830 mm
— mi-usées	795 mm
— usées	760 mm
Rapport de réduction des ponts de bogie	1 : 5,945
Nombre de moteurs par unité de traction	4
Accélération au démarrage jusqu'à 26,5 km/h (1)	1,33 m/sec^2
Accélération résiduelle à 60 km/h	0,58 m/sec^2
Décélération en freinage de service (1)	1,20 m/sec^2
Variation d'accélération (2)	0,8/1,5 m/sec^3
Vitesse commerciale (3)	31,6 km/h
Taux de récupération théorique de 72 à 0 km/h (4)	73 %
Tension d'alimentation du 3e rail :	
— nominale	750 V
— minimale	500 V
— maximale	900 V
Tension de la batterie :	
— nominale	110 V
— minimale (charge batterie hors service)	77 V
— maximale	121 V
Capacité de la batterie	58 Ah

(1) Indépendante de la charge (de 0 à 4/4 charge).
(2) Ajustable.
(3) Sur trajet type de 575 m en palier, à charge normale et avec temps d'arrêt de 18 secondes.
(4) Défini comme le rapport entre la puissance renvoyée au réseau par une voiture et la puissance totale de freinage développée par les moteurs de traction.



III. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES CIRCUITS DE PUISSANCE

Description

Circuits de puissance

Un schéma général des circuits de puissance d'une unité de traction complète est donné sous une forme simplifiée à la figure 6.

On y remarque les particularités suivantes :

- la partition de l'équipement de puissance de l'unité de traction en 2 équipements entièrement autonomes (à l'exception des organes de tête : prises de courant, commutateur de prise d'atelier, sectionneur de mise à la terre, disjoncteur de réseau et self d'entrée).

Cette partition de l'équipement de traction (qui existe, bien entendu, aussi bien pour les circuits d'asservissement que pour les circuits de puissance) garantit l'« autodépannage » des rames de métro en cas d'avarie accidentelle de l'équipement d'une voiture.

- la présence, en amont du disjoncteur réseau, de 2 appareils de commutation :

— le commutateur de prise d'atelier (CPA) qui permet, en atelier, l'alimentation de la rame par un câble souple; cet appareil est à commande mixte (électropneumatique et manuelle);

— le sectionneur de mise à la terre (SMT) qui assure séquentiellement l'isolation des circuits de puissance vis-à-vis du 3e rail et la décharge complète des condensateurs du filtre d'entrée; ce sectionneur est à commande manuelle uniquement;

- l'existence de 3 disjoncteurs par unité de traction (le disjoncteur de réseau DjR et les 2 disjoncteurs de moteurs DjM). Ce système de protection permet, entre autres, d'assurer l'élimination sélective de l'équipement avarié d'une voiture;

- le couplage permanent en série des 2 moteurs de traction de chaque voiture. Cette disposition permet une simplification appréciable de l'appareillage électromécanique associé à chaque groupe de moteurs.

- l'utilisation des mêmes contacteurs KI1 à KI4 pour réaliser la commutation traction - freinage et l'inversion du sens de marche.

Le tableau II indique les séquences de fonctionnement réalisées dans les différents régimes de marche.

Fig. 6. - Diagramme des circuits de puissance d'une unité de traction.

* vers ventilateurs des hacheurs.

** vers convertisseur, compresseur, circuits de chauffage.

CEx	= condensateur d'extinction
CPA	= commutateur de prise d'atelier
CR	= condensateurs du filtre de réseau
DB	= diode de blocage
DjM	= disjoncteur de moteurs
DjR	= disjoncteur de réseau
DRL	= diode de roue libre
E	= convertisseur de pré-excitation
KAF1... 3	= contacteurs de court-circuitage des résistances additionnelles de freinage
KF	= contacteur de couplage freinage
KI1... 4	= contacteurs d'inversion
KLV	= contacteur de couplage « Lavage de voiture »
KSh1,2	= contacteurs de shuntage
KT	= contacteur de couplage traction
LEx	= self d'extinction
LM	= self de lissage des moteurs
LR	= self de réseau
M1,2	= moteurs de traction
PA	= prise d'atelier
PC	= prises de courant (3e rail)
QD	= relais différentiel
RAF	= résistance additionnelle de freinage
RFR1... 3	= résistances de freinage rhéostatique
RSh1,2	= résistances de shuntage
SMT	= sectionneur de mise à la terre
ThEx	= thyristor d'extinction
THF1,2	= thyristors de freinage
ThP1,2	= thyristors principaux
V1	= voiture 1
V2	= voiture 2

TABLEAU II : Séquence de fonctionnement des contacteurs (dans le sens de marche *avant)*

Régime de fonctionnement	Gammes de vitesses (km/h)		DjR	DjM	KT	KI1	KI2	KF	KI3	KI4	KAF1	KAF2	KAF3	KSh1	KSh2	KLV(*)
TRACTION	0-40		x	x	x	x	x									
	40-50		x	x	x	x	x							x		
	> 50		x	x	x	x	x							x	x	
DERIVE	0-15		x	x	x	x	x									
	> 50		x	x				x	x	x						
FREINAGE	> 62		x	x				x	x	x				x		
	62-50		x	x				x	x	x	x			x		
	50-40		x	x				x	x	x	x	x		x		
	40-32		x	x				x	x	x	x	x	x	x		
	32-0		x	x				x	x	x	x	x	x			
LAVAGE (*)	1,6	V1		x	x	x	x									
		V2	*	x					x	x	x	x	x			x

(*) Le contacteur KLV n'existe que sur la voiture 2.
V1 = équipement de la voiture 1.
V2 = équipement de la voiture 2.

Fonctionnement en traction [2]

Pendant la phase de conduction des thyristors principaux, le courant venant du réseau (par les sectionneurs CPA et SMT, le disjoncteur DjR, la self LR et le relais différentiel QD) traverse ensuite successivement :

— la self LR du filtre d'entrée;
— les thyristors principaux ThP1 et ThP2;
— la diode de blocage DB;
— la self de lissage LM;
— le disjoncteur DjM;
— les contacteurs d'inversion KI1 - KI2 (en marche AV);
— les moteurs de traction M1 et M2;
— le contacteur de couplage traction KT.

Pendant la phase de blocage des thyristors principaux, la circulation du courant moteur est assurée par la diode de roue libre DRL.

Le shuntage des moteurs s'effectue en 2 crans (42 et 56 %) par la fermeture successive des 2 contacteurs KSh1 et KSh2 qui mettent en parallèle sur les inducteurs les résistances purement ohmiques RSh1 et RSh2.

Le hacheur est mis hors service lorsque la tension du réseau est inférieure à 400 V ou supérieure à 1 050 V.

Entre ces 2 limites, le courant de démarrage contrôlable par le hacheur est fonction du courant réseau, comme indiqué à la figure 7.

Le courant absorbé au réseau est limité à 850 A par voiture.

Le hacheur fonctionne à la fréquence fixe de 250 Hz.

Cependant, le rapport cyclique minimal réalisable dans ces conditions ne permettant pas de limiter le courant des moteurs à une valeur suffisamment basse lorsque la vitesse est nulle, on travaille, tout au début du démarrage, « en sous-harmonique », en inhibant la commande des thyristors principaux quand le courant dans les moteurs dépasse la valeur consignée.

Fonctionnement en freinage [2]

Les moteurs fonctionnent en génératrices à auto-excitation série. Le convertisseur de préexcitation E facilite et accélère l'amorçage des machines à basse vitesse.

Pendant la phase de conduction des thyristors principaux, le courant débité par les moteurs M1 et M2 circule dans

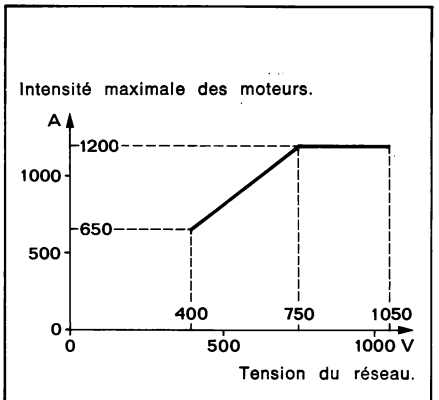


Fig. 7. - Limitation du courant débité par le hacheur en fonction de la tension du réseau.

le circuit formé par les contacteurs d'inversion KI3 et KI4 (sens de marche AV), la résistance additionnelle de freinage RAF (éventuellement court-circuitée par les contacteurs KAF1, KAF2, KAF3), le contacteur de couplage-freinage KF, les thyristors ThP1 et ThP2, la diode de blocage DB, la self de lissage LM et le disjoncteur-moteurs DjM.

Pendant la phase de blocage des thyristors principaux, deux circuits sont possibles selon les circonstances :
— dans le premier cas, le courant qui circulait dans les thyristors principaux est transféré dans les branches RFR1 à RFR3 de la résistance de freinage rhéostatique, via les thyristors ThF1 et ThF2. C'est le freinage dit « rhéostatique »;
— dans le second cas, le courant des moteurs retourne au réseau via le filtre d'entrée LR, le disjoncteur DjR et les frotteurs du 3e rail d'une part, via le rail de roulement et la diode de roue libre DRL d'autre part. C'est le freinage dit « par récupération ».

Le freinage par récupération est prioritaire quand la tension V_{CR} aux bornes du filtre d'entrée est comprise entre 675 V et 950 V.

Le freinage rhéostatique prend naissance lorsque le freinage par récupération seul n'est plus possible, ce qui se traduit par le fait que la tension V_{CR} tend à dépasser 950 V. Les 2 freinages sont alors conjugués, l'énergie que le réseau ne peut absorber étant déversée dans les résistances de freinage rhéostatique. La conjugaison entre les deux modes de freinage se fait à chaque cycle de hachage, les thyristors de freinage rhéostatique étant allumés aussitôt après le blocage des thyristors principaux dès que $V_{CR} \geqslant 950$ V.

C'est ce qu'on appelle le freinage « mixte », le seul à permettre pratiquement un taux de récupération élevé en exploitant en permanence toute la capacité d'absorption du réseau. Comme on le sait, ACEC a été le premier, voici quelques années déjà, à appliquer ce système à des équipements fabriqués en série.

La disposition schématique adoptée permet d'obtenir 2 valeurs différentes pour la résistance de freinage rhéostatique.

Selon la valeur du courant de freinage demandé et selon la vitesse de la voiture, la commande électronique ordonne l'allumage d'une seule branche de thyristors de freinage ou l'allumage simultané des 2 branches ThF1 et ThF2. Cette partition en 2 branches permet de réaliser, à n'importe quelle vitesse et sans sollicitations excessives du hacheur, toute la gamme désirée des efforts de freinage rhéostatique.

La stabilité du freinage par récupération à grande vitesse est obtenue par l'utilisation simultanée de 2 méthodes [2] : insertion des résistances additionnelles de freinage et affaiblissement du champ des moteurs.
— A grande vitesse, l'entièreté de la résistance additionnelle est insérée et le moteur est shunté de 42 %.
— Au fur et à mesure que la vitesse diminue, on élimine d'abord la résistance additionnelle en 3 gradins, puis on « déshunte » les moteurs.

La subdivision de la résistance additionnelle en 3 gradins permet de réduire notablement les pertes dans cette résistance et d'augmenter corrélativement de façon non négligeable le taux de récupération.

La figure 8 donne l'évolution de la tension aux bornes des moteurs ainsi qu'une image de l'énergie récupérable au cours d'un freinage.

Pour éliminer tout risque de fonctionnement instable en freinage, on ouvre le disjoncteur de tête DjR dès que la tension aux bornes du filtre d'entrée descend en dessous de 675 V.

Le freinage s'effectue, dans ces conditions, de façon purement rhéostatique. L'équipement est tel qu'il permet l'amorçage du freinage en l'absence de la tension du réseau.

Couplage « lavage des voitures »

Les voitures sont pourvues d'un système original permettant le maintien automatique de la très faible vitesse (environ 1,6 km/h) nécessaire pour le lavage des voitures.

Ce système, mis en service par un interrupteur situé dans le poste de conduite, utilise simplement un couplage particulier des moteurs de traction :
— les moteurs de la voiture 1 sont couplés en traction et on leur fait développer l'effort minimal de traction;
— ceux de la voiture 2 sont couplés en génératrices « série » débitant sur une résistance appropriée de faible valeur ohmique.

La vitesse de l'unité de traction se stabilise naturellement à la valeur très basse pour laquelle l'effort de traction développé par les moteurs de la voiture 1 est égal à l'effort de freinage développé par les moteurs de la voiture 2.

Ce système autorégulateur très simple fait l'objet d'un brevet ACEC.

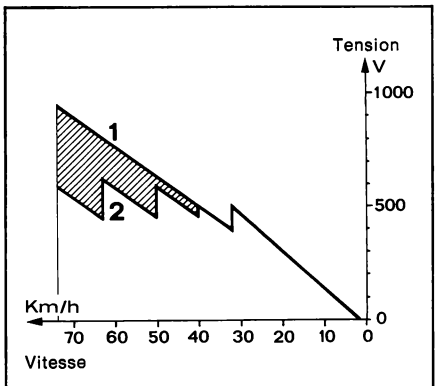


Fig. 8. - Evolution de la tension aux bornes des moteurs (courbe 1) et du hacheur (courbe 2) au cours d'un freinage à courant maximal.
La zone hachurée représente les pertes dans la résistance additionnelle de freinage.

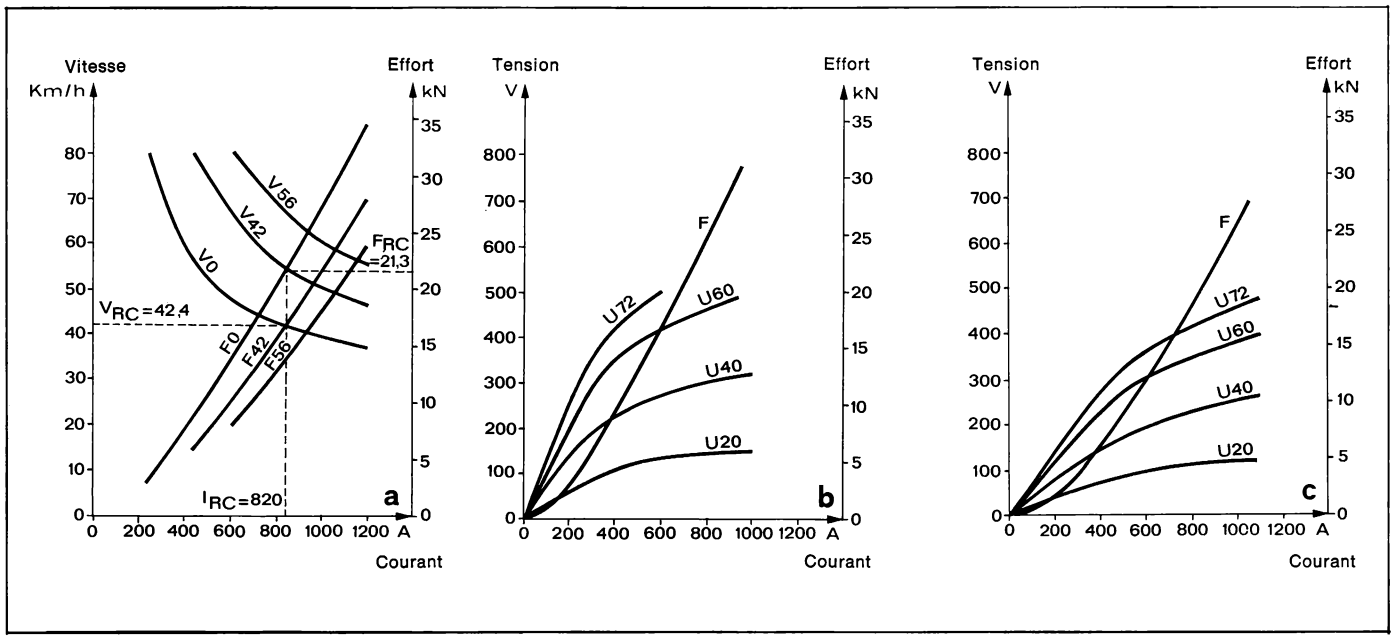


Fig. 9. - Courbes de base du moteur ME 155 S.

a) en traction

F 0	= effort à plein champ
F 42	= effort à champ réduit de 42 %
F 56	= effort à champ réduit de 56 %
I_{RC}	= courant en régime continu
F_{RC}	= effort en régime continu
V_{RC}	= vitesse en régime continu

b) en freinage à plein champ

F	= effort de freinage
U20..40..60..72	= tension aux bornes du moteur à 20..40..60.. 72 km/h

c) en freinage à champ réduit de 42 %

F et U : voir (b)

Réalisation des performances

Caractéristiques des moteurs ME 155 S en traction et en freinage

Les diagrammes de la figure 9 donnent les courbes de base des moteurs ME 155 S, tant en traction qu'en freinage.

On remarque sur les diagrammes de traction que la caractéristique plein champ n'est atteinte au courant de démarrage que pour la vitesse de 37 km/h, soit plus de la moitié de la vitesse maximale de service (72 km/h).

Ceci correspond à un moteur bien adapté à la commande par hacheur et particulièrement avantageux pour le freinage par récupération.

On relève en effet sur le diagramme 9 c que les tensions induites à la vitesse maximale de service et aux courants maximaux ne dépassent que de très peu la tension normale du réseau (470 V par moteur, soit 940 V pour deux moteurs en série).

Les résistances additionnelles, à insérer en freinage pour faire baisser la tension du circuit des moteurs jusqu'au niveau de la tension du réseau, ont pu, de la sorte, être réduites à un strict minimum, ce qui a permis de réaliser la valeur élevée imposée au taux de récupération.

Caractéristiques effort/vitesse et courant du réseau/vitesse

Les courbes de la figure 10 représentent le fonctionnement de l'équipement complet, en traction et en freinage, lorsque les hacheurs alimentent les moteurs dont les caractéristiques sont données à la figure 9.

On peut calculer que ces équipements réalisent entièrement les performances spécifiées au chapitre II.

Le diagramme figure 11 donne à titre d'exemple les courbes de marche sur un parcours type de 575 m en palier.

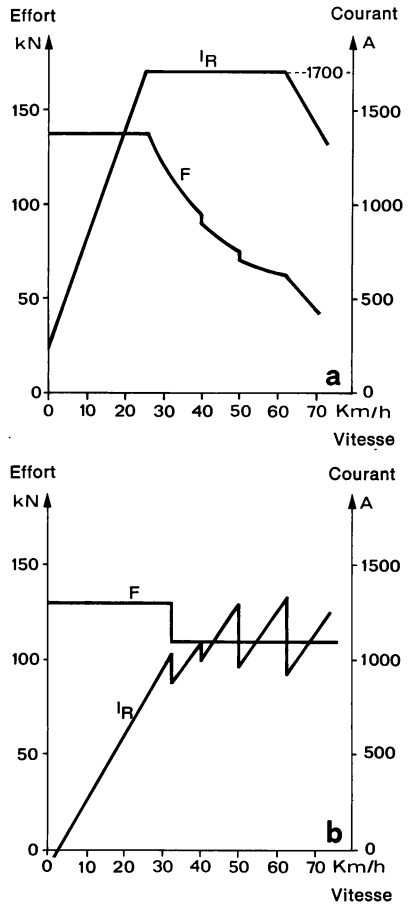


Fig. 10. - Courbes caractéristiques des équipements en traction (a) et en freinage (b).
F = effort par unité de traction
I_R = courant absorbé (ou renvoyé) au réseau, par unité de traction

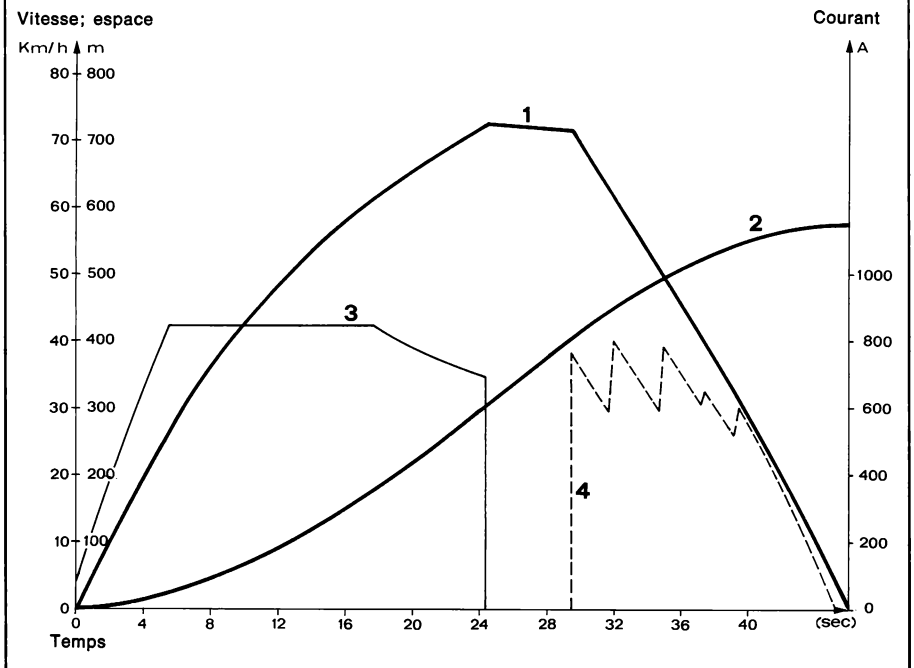


Fig. 11. - Courbes de marche d'une unité de traction, sur un parcours type de 575 m en palier, à charge normale.
1 = vitesse
2 = espace parcouru
3 = courant réseau en traction
4 = courant réseau en freinage

IV. LE HACHEUR

Résumé des données

Les données principales de dimensionnement sont résumées au tableau III.

Composants

La constitution générale des circuits du hacheur apparaît sur le schéma de la figure 6 représentant les circuits de puissance d'une unité de traction (cadres en traits mixtes).

La self d'entrée, commune aux 2 équiments de puissance, est une self à circuit magnétique ouvert, constituée d'un noyau magnétique central et d'un bobinage en méplats d'aluminium (fig. 12). Cette technologie permet de réduire considérablement le poids de ce composant lourd. La self est définie en régime continu à 0,5 mH — 1 700 A.

Les *condensateurs du filtre d'entrée* sont répartis par moitié entre les 2 voitures. Chacune des 2 batteries de condensateurs comporte 8 cuves de 440 μF (fig. 13).

Les *éléments semi-conducteurs* de puissance, diodes et thyristors, sont du type « disque » à refroidissement bilatéral (fig. 14).

Les thyristors principaux (ThP1 - ThP2), par exemple, sont du type ACEC T402A/14 avec les caractéristiques suivantes :

— courant moyen (ondes rectangulaires, angle de passage 360°) 500 A
— tension de blocage direct 1 400 V
— tension de blocage inverse 1 400 V
— temps d'inversion 60 μsec

Pour obtenir une bonne accessibilité, on a adopté pour le montage une technologie modulaire. Un module comporte, outre 2 thyristors (ou diodes) montés « en sandwich » entre 2 radiateurs en aluminium, un circuit imprimé monté sur la face avant (fig. 15).

Le circuit imprimé comprend les circuits RC de protection, les résistances d'équilibrage et, dans le cas de modules à thyristors, les transformateurs d'impulsions à 2 secondaires ainsi que les circuits de mise en forme des impulsions.

L'ensemble semi-conducteurs et radiateurs est enfermé dans une gaine en polyester formant canal de ventilation et assurant l'isolation des modules entre eux.

Le *circuit d'extinction* est constitué essentiellement d'une self à air et d'un condensateur formant un circuit oscillant à 2,5 kHz. Pour obtenir un facteur de qualité élevé, on a réalisé la self à partir de conducteurs en cuivre à fils divisés.

La *self de lissage* est de technologie similaire à la self du filtre d'entrée. Son inductance est de 2,5 mH à 1 200 A.

Les *transducteurs de mesure* des courants principaux sont du type magnétique.

Tableau III : Caractéristiques générales du hacheur.

Tension d'alimentation : nominale : 750 Vcc minimale : 400 Vcc maximale : 1 050 Vcc
Valeur maximale du courant réseau : 850 A/hacheur
Valeur maximale du courant de sortie : pour 750 V $<$ U $<$ 1 050 V : 1 200 A pour 400 V $<$ U $<$ 750 V : voir diagramme figure 7
Valeur efficace du courant de sortie admissible en régime continu : 820 A
Puissance nominale : 615 kW/hacheur
Fréquence de hachage : 250 Hz

Montage en coffres

Charpente

L'entièreté du hacheur de chaque voiture est rassemblée en un coffre unique dont l'ossature est en acier et les parois en polyester armé. Etant donné que l'on prévoit d'accéder aux composants par la face inférieure et par la face latérale extérieure, les panneaux d'obturation de ces 2 faces sont à montage et démontage rapide.

L'ossature en elle-même présente une grande flexibilité qui lui permet de s'adapter, sans sollicitations hyperstatiques excessives, aux déformations importantes de la caisse en aluminium des voitures.

Disposition intérieure

On a apporté un soin tout particulier à l'étude de la disposition intérieure des coffres, en vue d'assurer un accès aisé à tous les composants de l'équipement. Les composants pondéreux (selfs, bacs de condensateurs) sont fixés à l'ossature du coffre par l'intermédiaire de supports élastiques.

Les modules à semi-conducteurs sont logés, comme des tiroirs, dans des glissières fixées élastiquement à la charpente du coffre.

Câblage

Des précautions spéciales ont été prises pour le câblage des circuits traversés par des courants à di/dt élevé (notamment le circuit d'extinction) : les conducteurs aller et retour de ces circuits suivent des chemins parallèles, les plus proches possible l'un de l'autre, pour éviter que le champ magnétique de dispersion n'induise des courants de circulation dans le voisinage. Le câblage des circuits de mesure et des circuits de commande des thyristors est réalisé en câbles torsadés blindés et isolés dont le blindage est connecté à la masse générale électronique.

Ventilation

Le refroidissement de chaque hacheur est assuré par un groupe de ventilation aspirant sous la caisse à travers un filtre autonettoyant du type « cyclone ».

Partant du ventilateur, l'air de refroidissement passe successivement sur les éléments les plus sensibles à la température (semi-conducteurs), puis sur les composants thermiquement les plus robustes (condensateurs, selfs).

On note que le coffre du hacheur est mis sous pression par le ventilateur, pour empêcher les entrées de poussières ou de neige.

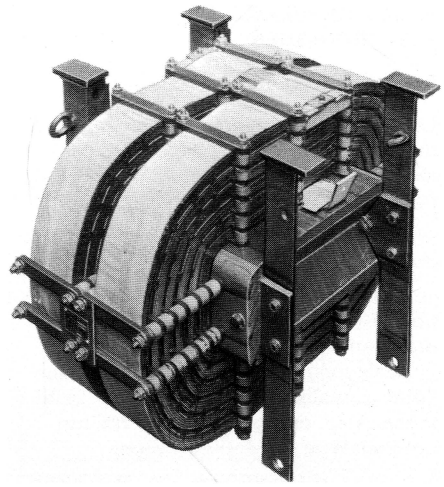


Fig. 12. - Self d'entrée.

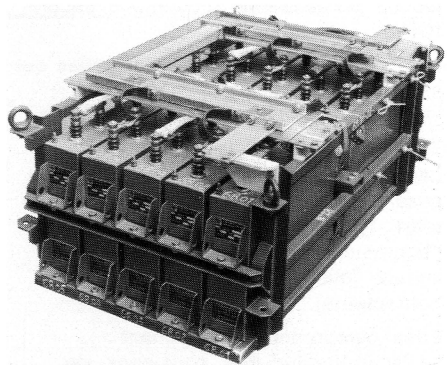


Fig. 13. - Condensateurs du filtre d'entrée.

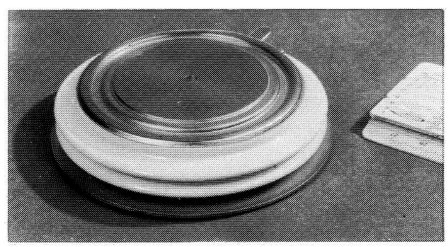


Fig. 14. - Thyristor à disque.

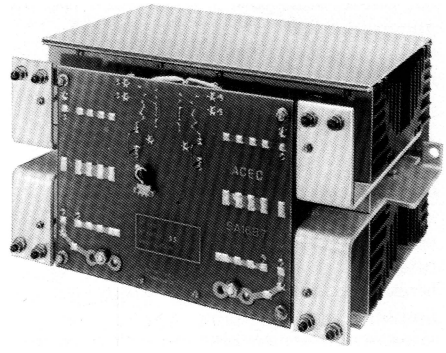


Fig. 15. - Module semi-conducteur.

V. LES REGULATIONS ELECTRONIQUES

Description fonctionnelle (fig. 16)

Les régulations électroniques ont pour fonction essentielle d'imposer dans les moteurs les courants de traction et de freinage

— répondant, d'une part, à la demande du conducteur;

— satisfaisant, d'autre part, aux conditions de confort imposées (limitation du « jerk ») et tenant compte des circonstances du moment telles que l'état d'occupation des voitures (adaptation à la charge) et l'état du rail (antipatinage et anti-enrayage).

Sur le plan fonctionnel, on doit distinguer dans les régulations 2 parties que nous appellerons respectivement *régulations primaires* et *régulations secondaires.*

Les *régulations primaires* sont celles qui assurent en direct :
— la *commande* du hacheur;
— sa *protection.*

Les *régulations secondaires,* appelées aussi *conformateur,* assurent le dialogue entre les régulations primaires et l'équipement conventionnel de la voiture (manipulateur, logique à relais, contacteurs).

Elles comprennent notamment :
— la *formation des consignes* de courant à l'intention du hacheur;
— les *mesures des vitesses* d'essieux et leurs diverses actions.

Pour la clarté de l'exposé nous décrirons d'abord les fonctions assurées par les régulations secondaires.

Formation des consignes

• La consigne **T** de courant moteur en traction est émise sous forme digitale (mise sous tension codée de 5 fils du train) par l'équipement de vitesse imposée ou directement par le manipulateur.

La consigne **F** de courant de freinage est émise sous forme analogique par un générateur de courant commandé également par l'équipement de vitesse imposée ou directement par le manipulateur.

• Le bloc Réception de consigne **Re** assure le décodage des signaux de consigne comme suit :
— les fils de train transportant la consigne de traction alimentent cinq relais Reed dont les contacts en se fermant construisent à la sortie d'un amplificateur les cinq niveaux de tension continue constituant la consigne analogique de courant de traction **Ict;**
— le signal analogique en courant émis comme consigne de freinage est mesuré à l'aide d'un transducteur magnétique, puis mis en forme pour fournir ã la sortie d'un amplificateur la tension continue constituant la consigne analogique de courant de freinage **Icf.**

L'information logique Demande de traction ou de freinage **Tra-Fre** venant des organes de conduite (équipement de vitesse imposée ou manipulateur) sélectionne la consigne unique **Ict** ou **Icf** qui sort finalement du bloc **Re.**

• Le bloc Limiteur de rampe **LR** situé en aval du bloc Réception de consigne limite la vitesse de variation de la consigne de courant moteur, de manière à éviter tout changement inconfortable d'accélération ou de décélération dans les transitions d'un régime à l'autre : application, reprise ou coupure de la traction, application ou coupure du freinage.

Les pentes d'apparition et de disparition de la consigne de sortie **IcL** sont ajustables et permettent de réaliser n'importe quelle « limitation de jerk » comprise entre 0,8 et 1,5 m/s^3.

• Le bloc Adaptation à la charge **Ach** qui suit le bloc **LR** réalise une adaptation automatique de la consigne de courant à la charge en voyageurs, de manière à conserver, dans tous les états d'occupation des voitures, la même utilisation du coefficient d'adhérence roues-rails et les mêmes performances d'accélération et de décélération.

La mesure de la charge suspendue totale (caisse + voyageurs) est effectuée par un transducteur électropneumatique, sensible à la pression régnant dans les coussins de suspension (signal **P**). On limite les variations trop brutales de la consigne de sortie **Icv** en filtrant la mesure de **P.**

• En cas de détection de patinage, enrayage ou survitesse, on agit de façon appropriée sur la consigne **Icv,** de façon à l'adapter à chaque instant à l'état du rail.

Les critères de détection et les actions résultantes sont développées au paragraphe suivant.

Les mesures de vitesses et leurs actions

• On mesure la vitesse des essieux de chaque bogie au moyen de capteurs statiques montés sur chaque moteur de traction face à une roue dentée (« roue phonique ») calée sur l'arbre. Ces capteurs, du type inductif à oscillateur haute fréquence incorporé, délivrent un signal impulsionnel dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de défilement des dents de la roue phonique. Ils fonctionnent correctement dans toute la gamme des températures de —25 °C à + 90 °C.

A sa réception dans le Convertisseur-Fréquence-Tension **N,** le signal de sortie de chaque capteur est redressé, puis envoyé dans un isolateur optique.
On engendre ainsi, à chaque commutation, une impulsion calibrée en amplitude et en largeur. L'intégration de ces impulsions fournit un signal continu de tension qui donne à une certaine échelle la mesure de la vitesse de rotation de chaque moteur.

Les signaux de vitesse ainsi obtenus sont utilisés pour :
— la commande des contacteurs de shuntage et des contacteurs d'élimination des résistances additionnelles de freinage;
— la commande de la substitution des freinages;
— la détection et la correction des patinages, des enrayages et des survitesses.

• Les ordres de commande des contacteurs de shuntage et des contacteurs d'élimination des résistances additionnelles de freinage sont élaborés dans le bloc **K** sur base des équations logiques construites à partir :
— de la détection des différents niveaux de vitesse d'une part;
— de la détection des états « traction » ou « freinage » d'autre part.

On commande ainsi les différents contacteurs **KSh** et **KAF** pour réaliser les séquences résumées dans le tableau II.

• La substitution du frein pneumatique au frein électrique est commandée par le bloc **Subs** où sont construites les équations logiques basées :
— d'une part sur la mesure de la vitesse N2 d'un des 2 moteurs;
— d'autre part sur la mesure du courant moteur IM.

Les signaux issus du bloc **Subs** agissent en parallèle sur le relais **Rsubs** pour ouvrir l'électrovalve de substitution et sur le bloc **Re** pour provoquer l'annulation de la consigne de courant de freinage.

En fonctionnement normal, la substitution est commandée systématiquement lorsque la vitesse de la voiture devient inférieure à 15 km/h. En même temps qu'on provoque l'application du freinage pneumatique, on coupe le freinage électrique et on s'arrange, en agissant sur la rampe du limiteur **LR,** pour que la vitesse de disparition de l'effort

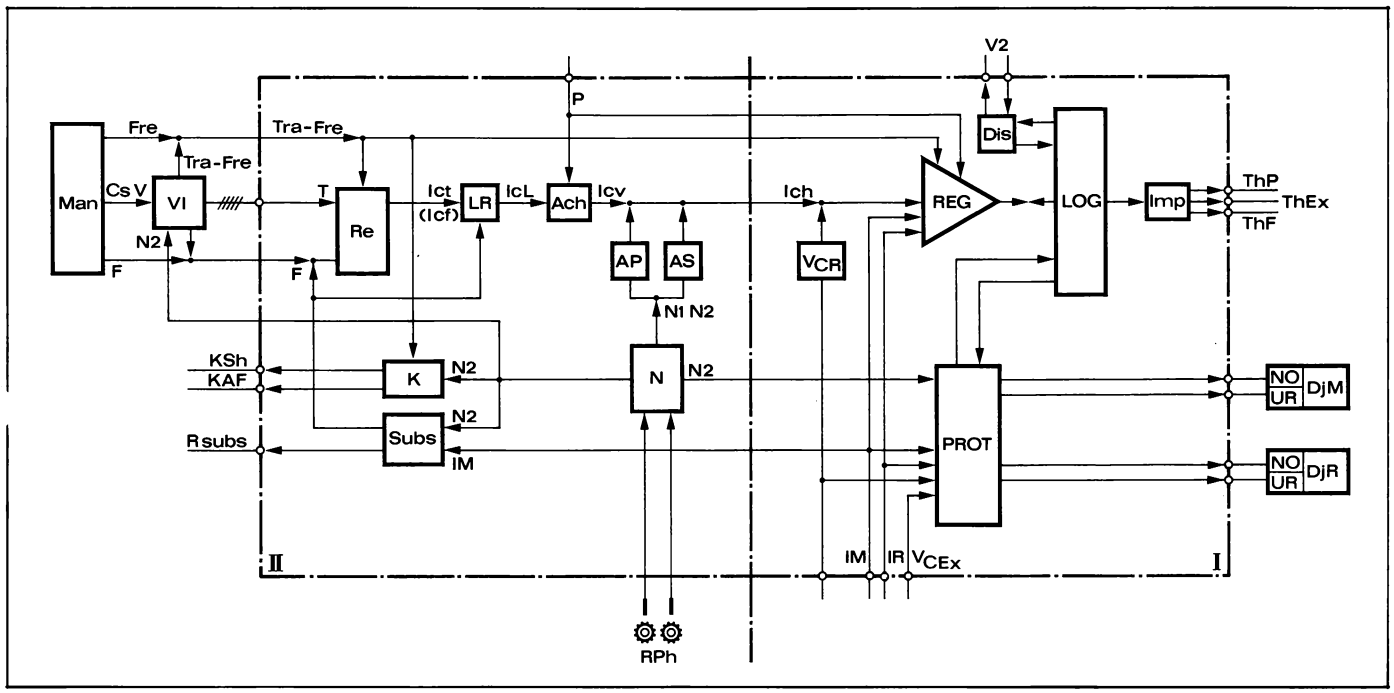


Fig. 16. - Régulations électroniques.

I	= régulations primaires
II	= régulations secondaires
Ach	= bloc adaptation à la charge
AP	= bloc antipatinage
AS	= bloc antisurvitesse
CsV	= consigne de vitesse
Dis	= distributeur séquentiel
DjM	= disjoncteur de moteurs
DjR	= disjoncteur de réseau
F	= consigne de freinage
Fre	= signal demande de freinage
Ich	= consigne de courant moteur issue des régulateurs
Icf	= consigne analogique du courant de freinage
IcL	= consigne du courant moteur traité par le limiteur de rampe
Ict	= consigne analogique du courant de traction
Icv	= consigne analogique du courant de sortie
IM	= mesure du courant moteur
Imp	= générateur d'impulsions
IR	= mesure du courant réseau
K	= bloc de commande des contacteurs KSh et KAF
KAF	= contacteurs de court-circuitage des résistances additionnelles de freinage
KSh	= contacteurs de shuntage
LOG	= bloc d'élaboration des équations logiques
LR	= limiteur de rampe
Man	= manipulateur
N	= convertisseur « fréquence-tension » de mesure des vitesses
N1	= vitesse du 1er moteur
N2	= vitesse du 2e moteur
NO	= fonctionnement normal de DjM ou de DjR
P	= mesure de la charge
PROT	= bloc protections
Re	= bloc réception de consignes
REG	= bloc régulation du courant moteur
RPh	= « roues phoniques » montées sur chaque moteur
Rsubs	= relais de substitution du freinage pneumatique au freinage électrique
Subs	= bloc de substitution du freinage pneumatique au freinage électrique
T	= consigne de traction
ThEx	= thyristor d'extinction
ThF	= thyristors de freinage
ThP	= thyristors principaux
Tra	= signal demande de traction
UR	= fonctionnement ultrarapide de DjM ou de DjR
V_{CEx}	= tension aux bornes des condensateurs d'extinction
V_{CR}	= tension aux bornes des condensateurs des filtres du réseau
VI	= équipement de vitesse imposée
V2	= voiture 2

électrique soit la même que la vitesse d'apparition de l'effort mécanique; on obtient ainsi une transition pratiquement insensible du frein électrique au frein mécanique.

La substitution est aussi provoquée automatiquement par disparition de la mesure du courant IM, si le courant de freinage disparaît alors que la vitesse est supérieure à 15 km/h.

Les blocs **AP** et **AS** (antipatinage et antisurvitesse) traitent les 2 signaux de vitesse N1 et N2 émanant du bloc N de manière à déceler tout commencement de glissement, de blocage d'essieu ou de survitesse et à prendre les mesures permettant d'enrayer ces phénomènes.

— Il y a décel de patinage ou d'enrayage lorsque la fonction

$$F = \left| N1 - N2 \right| + \left| \frac{d}{dt} (N1 - N2) \right| + \left| \frac{dN2}{dt} \right|$$

dépasse un certain seuil.

Dans ce cas, on réduit la consigne du courant **Ich** dans le rapport de 1 à 0,3;

— Il y a décel de survitesse lorsque l'un quelconque des 2 signaux N1 ou N2

dépasse le seuil fixé pour la survitesse, à savoir 80 km/h.

On annule alors complètement la consigne de courant **Ich.**

A noter que :
— les signaux de mesure de vitesse de rotation des roues sont corrigibles, en fonction de l'usure des roues, à l'aide de potentiomètres aisément accessibles;
— les différents seuils de décel sont également ajustables.

La commande du hacheur

Le régulateur de courant moteur **REG** est du type proportionnel, intégral; ses paramètres ont été calculés sur base des théories développées dans un numéro précédent de notre Revue [2].

Par l'action du signal Demande de traction ou de freinage, on adapte le terme intégral et le terme proportionnel au régime de fonctionnement.

La consigne de courant moteur **Ich** issue du bloc des régulations secondaires est soumise, avant son entrée dans le régulateur de courant, à l'action du bloc V_{CR}.

On écrête ainsi cette consigne **Ich** en fonction de la tension disponible aux bornes des condensateurs du filtre d'entrée, de façon à respecter en tous temps l'enveloppe des courants contrôlables par le hacheur (fig. 7).

Outre la mesure du courant moteur IM, on introduit encore à l'entrée du régulateur **REG** la mesure du courant réseau IR.

A partir de cette mesure, le régulateur agit sur le courant moteur pour limiter le courant réseau à une valeur maximale prédéterminée, acceptable sur le plan thermique par les thyristors principaux (voir tableau III).

A noter que le signal de mesure de la charge intervient dans le régulateur pour adapter le niveau du courant limite réseau au poids total des voitures, si bien que l'on obtient, non seulement au démarrage, mais pratiquement dans toute la gamme des vitesses, des performances de traction indépendantes de la charge.

• La commande logique du hacheur est organisée par le distributeur séquentiel **Dis** fonctionnant à la fréquence unique de hachage 250 Hz fournie par un oscillateur-pilote du type magnétique.

Chaque voiture possède son oscillateur-pilote, mais un seul oscillateur est en service par unité de traction : c'est l'oscillateur de la voiture 1 qui fournit les signaux d'horloge pour les 2 voitures, le signal de la voiture 2 étant décalé de 180° électriques par rapport au signal de la voiture 1. L'oscillateur monté sur la voiture 2 est alors hors service.

Si l'équipement hacheur de la voiture 1 est éliminé, le signal d'horloge de la voiture 2 est fourni par l'oscillateur de cette voiture 2.

Les équations logiques de la commande du hacheur sont élaborées dans le bloc **LOG** dont les principes généraux de fonctionnement ont déjà été exposés [2].

Notons seulement quelques conditions particulières qui influencent la logique de cet équipement (voir page 9, fonctionnement en traction et en freinage).

— Aux premiers instants du démarrage, fonctionnement du hacheur en sous-harmonique, de manière à limiter la tension appliquée aux bornes des moteurs.

— Conjugaison entre freinage rhéostatique et freinage à récupération.

— Amorçage du freinage électrique sans tension réseau (disjoncteur d'entrée ouvert quand la tension du réseau est inférieure à 675 V).

— Amorçage du freinage électrique à très faible vitesse.

— Commande séparée des 2 branches de thyristors alimentant les 2 résistances de freinage rhéostatique.

Les générateurs d'impulsions **Imp** attaquant les grilles des thyristors **ThP, ThE** et **ThF** sont du type « à oscillateurs bloqués [2].

Les dispositifs de protection

Les protections du hacheur sont élaborées à partir :
— des mesures des courants moteur IM et réseau IR;
— des mesures de tensions V_{CR} et V_{CE};
— de la mesure de vitesse N2 effectuée sur un des 2 moteurs.

On peut classer ces dispositifs de protection en 2 catégories, selon qu'ils agissent directement sur la commande du hacheur (autoprotection du hacheur) ou sur la commande des disjoncteurs de puissance (sécurités périphériques).

• L'autoprotection du hacheur est assurée par les dispositifs électroniques de sécurité qui, via des variables de verrouillage, arrêtent le hacheur lorsque celui-ci est soumis à des conditions dangereuses de fonctionnement telles que :
— tension d'entrée trop élevée ou trop basse;

— courant moteur excessif;
— consigne courant moteur trop faible;
— défaut de l'alimentation électronique;
— tension trop élevée aux bornes du condensateur d'extinction.

• Les sécurités périphériques agissent sur les disjoncteurs du circuit de puissance : disjoncteur réseau DjR et disjoncteur moteur DjM. On distingue les 2 voies de commande :
— ouverture du circuit de la bobine de maintien (déclenchement « normal »);
— décharge d'une capacité dans le circuit de déclenchement (déclenchement « ultra-rapide »).

Le tableau IV résume les critères de déclenchement — « normal » **N** ou « ultra-rapide » **UR** — des 2 disjoncteurs.

TABLEAU IV

Causes possibles de déclenchement	DjR		DjM	
	N	UR	N	UR
Surintensité du courant réseau	x	x	x	x
Surintensité du courant moteur			x	x
Consigne de courant présente en l'absence de courant moteur			x	
Présence de courant moteur en l'absence de consigne			x	
Tension du filtre d'entrée en freinage < 675 V	x	x		
Tension du filtre d'entrée $> 1\,800$ V	x	x		
Fusion d'un fusible du hacheur			x	

Technologie des équipements électroniques

Présentation

Tous les circuits électroniques sont rassemblés en 6 modules enfichables :
— un grand boîtier d'alimentation (fig. 17) où sont construites les tensions stabilisées $\pm$ 24 V;
— cinq petits boîtiers de régulation (fig. 18).

Chaque boîtier enfichable comporte deux circuits imprimés sur lesquels sont rassemblées une ou plusieurs fonctions Ces circuits sont montés sur charnière à leur partie basse et vissés au châssis du boîtier à leur partie haute.
Sur la face frontale du boîtier, sont fixés les connecteurs de raccordement ainsi que les dispositifs de test (interrupteurs monostables et voyants de différentes couleurs) qui permettent d'effectuer rapidement, sans appareil de mesure, un contrôle du fonctionnement correct du boîtier.

La face arrière du boîtier sert de support à un détrompeur mécanique, ainsi qu'aux éléments de puissance qui construisent l'alimentation stabilisée $\pm$ 15 V propre au boîtier.

Assurance qualité

Pour obtenir des équipements électroniques la MTBF (Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement) élevée requise, il est indispensable de leur faire subir des contrôles sévères à tous les stades de la fabrication.

• A leur entrée en usine, tous les composants sont testés par échantillonnage selon la norme MIL-STD-1050. Les composants dont les caractéristiques ne sont pas garanties par des normes militaires sont l'objet de tests plus

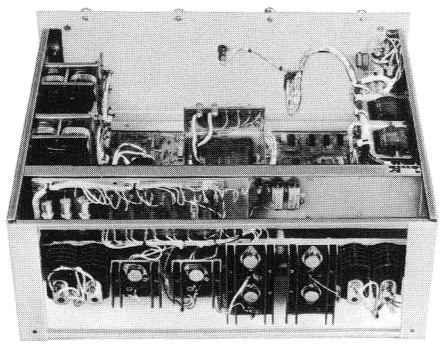


Fig. 17. - Boîtier d'alimentation.

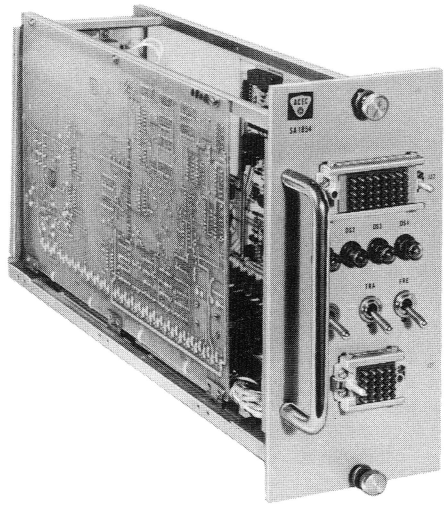


Fig. 18. - Boîtier de régulation.

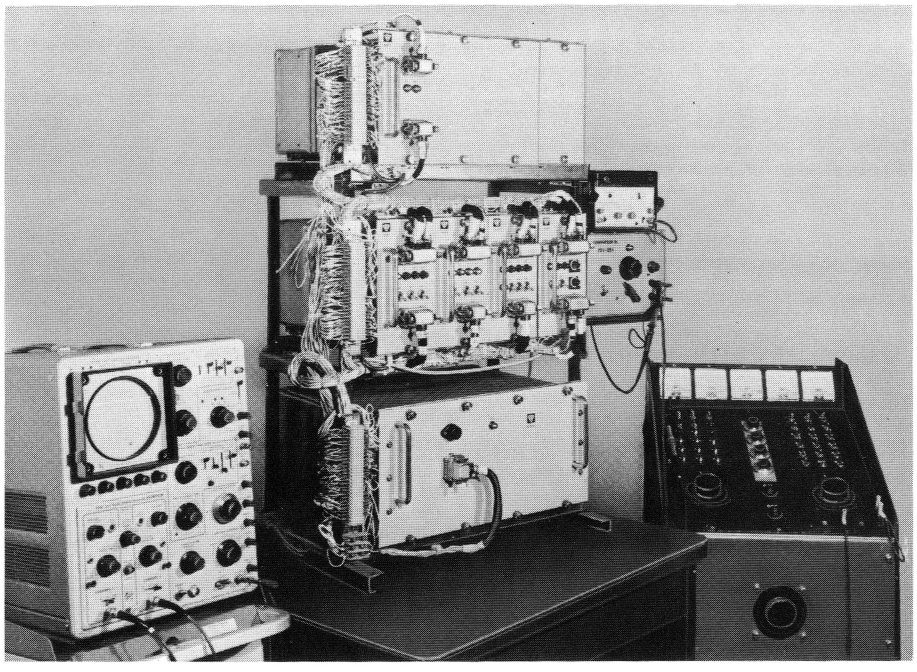


Fig. 19. - Banc pour vérification finale des boîtiers.

rigoureux encore : les circuits intégrés micrologiques du type HTL, par exemple, sont soumis, hors tension, à dix cycles thermiques (—30 °C à +70 °C) en 24 heures; ensuite ils subissent à 100 % un test fonctionnel sur machine automatique « SESAME ».

- Tous les circuits imprimés, câblés et soudés, subissent un contrôle visuel; ils sont ensuite soumis à 5 cycles thermiques (— 25 °C à + 70 °C), puis subissent un test dynamique complet de toutes les fonctions sur machine automatique; ils sont, alors seulement, envoyés au vernissage et à l'atelier d'assemblage.

- Les boîtiers assemblés subissent à leur tour un examen visuel détaillé, au cours duquel une attention particulière est portée aux câblages et notamment au raccordement des blindages de fils. Un test dynamique complet est ensuite effectué sur chaque boîtier.

Les boîtiers d'alimentation où sont rassemblés beaucoup de composants lourds subissent tous un test fonctionnel de 30 secondes sur une table à secousses.

- La vérification finale s'effectue sur un banc de test spécialement conçu pour permettre le contrôle par simulation d'un équipement électronique complet de commande de hacheur.

Ce banc (fig. 19) est équipé, d'une part, de sources variables de courant et de tension ainsi que d'interrupteurs permettant de simuler les variables de commande de l'équipement électronique, d'autre part, de voyants et de charges permettant de visualiser le fonctionnement correct des variables de sortie.

Dans son utilisation, le banc de test doit toujours être associé à un équipement complet et sain de commande de hacheur. Lorsqu'un boîtier suspect doit être vérifié, on le substitue au boîtier homologue de l'équipement sain du banc de test et on lui fait subir alors les vérifications détaillées prévues dans les procédures de dépannage.

VI. MOTEURS DE TRACTION

Résumé des données

Les données du moteur ME155S sont résumées au tableau V

Contraintes particulières

Les moteurs de traction sont soumis à de nombreuses contraintes particulières :

- L'exploitation du métro est caractérisée par des démarrages et freinages se répétant à haute cadence avec des taux élevés de variation de vitesse. Il en résulte des sollicitations dynamiques très importantes dans le rotor.

- L'alimentation par hacheur soumet le moteur à un courant « pollué » d'harmoniques et dont le taux de variation transitoire peut être élevé. Il en résulte des sollicitations supplémentaires sur les plans mécanique, thermique et surtout électrique (commutation). Nous renvoyons le lecteur, pour plus de détails, à l'article « Quelques problèmes de conception dans les machines à courant continu alimentées par semi-conducteurs » paru dans la revue ACEC [3].

- La liaison mécanique réalisée par l'induit du moteur entre les deux essieux d'un bogie « monomoteur » soumet l'arbre à un couple pulsatoire.

Réalisation

Sans entrer dans les détails, nous nous bornerons à montrer comment le constructeur des moteurs a tenu compte des contraintes énumérées ci-avant.

Les figures 20 et 21 illustrent et complètent ces remarques.

Stator

La carcasse du moteur est faite d'une virole soudée, de forte épaisseur, à laquelle on vient adjoindre, par soudure également, une chambre de collecteur en forme de cloche.

Cette conception particulièrement robuste permet de déplacer la vitesse de résonance hors de la zone de fonctionnement de la machine, évitant ainsi les sollicitations vibratoires néfastes pour la captation du courant.

Les enroulements d'excitation et de commutation sont constitués de méplats de cuivre enroulés sur plats.

L'isolation classe F est du type NOMICACEC décrit dans la Revue ACEC [4].

Les enroulements sont ainsi parfaitement bloqués et on obtient un ensemble

TABLEAU V

Régime continu :	
350 V 820 A 1 688 tr/min 264 kW	
Courant maximal de démarrage :	1 200 A
Courant maximal de freinage :	1 050 A
Vitesse maximale de rotation :	3 180 tr/min

particulièrement robuste, résistant aux poussières et à l'humidité et de haute tenue diélectrique.

Rotor

Le calcul de l'arbre tient compte de la transmission des couples pulsatoires de torsion caractéristiques des bogies monomoteurs.

Le bobinage est du type parallèle avec connexions équipotentielles.

Ici aussi, l'isolation NOMICACEC à postimprégnation sous vide en résine époxy classe F assure l'immobilisation parfaite des sections d'induit et des équipotentielles lors des accélérations et décélérations importantes imposées au moteur. Le sertissage des développantes est réalisé en « roving » de verre imprégné de résine polyester polymérisée à chaud.

Captation du courant

Le choix des matériaux de base (lames en cuivre à l'argent, micanites entre-lames au glyptal et vés isolants de première qualité) ainsi que la sélection du cycle optimal de traitements rendent le collecteur tout à fait stable et capable de résister aux sollicitations dynamiques d'accélération et de vitesse.

Les sections d'induit et les équipotentielles sont raccordées au collecteur par le procédé TIG (Tungsten Inert Gas = soudure à haut point de fusion, sous atmosphère contrôlée et sans apport de métal).

Les porte-balais, à pression constante, sont fixés radialement à la chambre de collecteur; du fait du porte-à-faux réduit ainsi obtenu, la rigidité du montage est augmentée, les vibrations de flexion transmises au collecteur deviennent négligeables et la captation du courant est fortement améliorée.

Ventilation

Le moteur est refroidi par un ventilateur incorporé en aluminium coulé.

L'air de refroidissement est aspiré au travers des ventelles pratiquées dans les portières de visite du collecteur.

Paliers et roulements

Les paliers, particulièrement robustes, contribuent à la rigidité d'ensemble du moteur et à l'élimination des vibrations transmises au rotor.

Les roulements choisis sont largement dimensionnés.

Le palier situé du côté du collecteur est muni d'un roulement à billes au jeu interne spécialement faible pour réduire les vibrations au collecteur. Le second palier comporte un roulement à rouleaux avec cage massive en bronze.

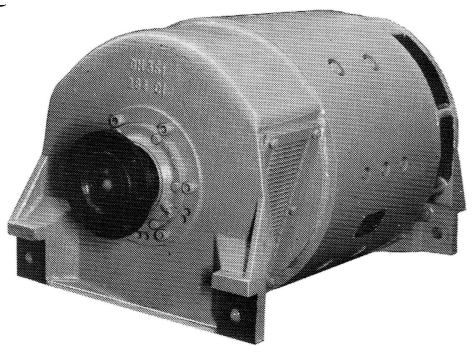


Fig. 20. - Moteur de traction ME 155 S.

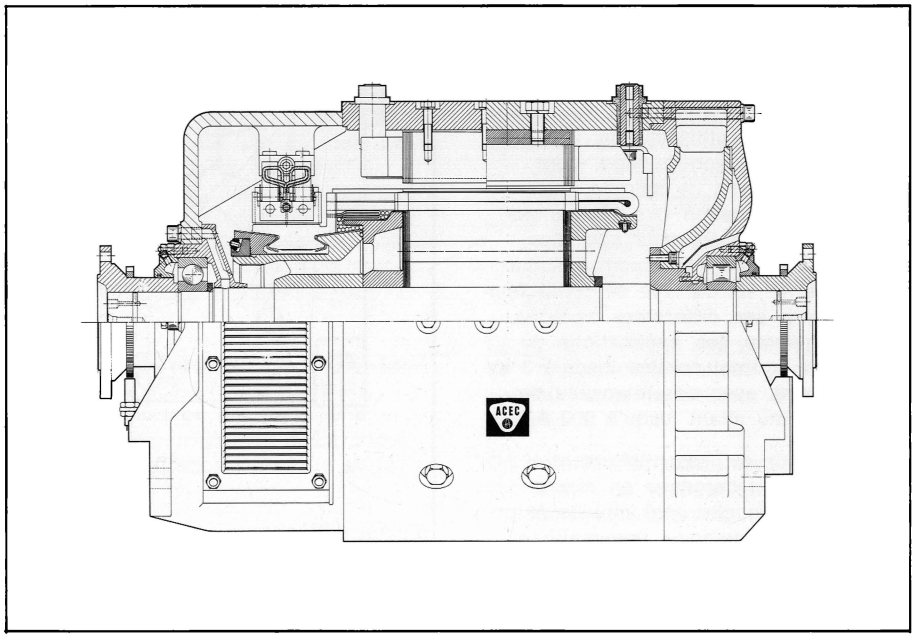


Fig. 21. - Demi-coupe du moteur.

VII. L'APPAREILLAGE ELECTROMECANIQUE

Introduction

L'avènement des hacheurs en traction a certes réduit la quantité d'appareillage électromécanique utilisé.

Cependant, l'importance des fonctions qui restent à assumer par cet appareillage dans un équipement à thyristors justifie pleinement que l'on poursuive les efforts de développement dans ce domaine, pour continuer à améliorer les performances et la fiabilité tout en réduisant les dimensions et le poids.

Pour répondre à ces objectifs, les appareils ACEC de la nouvelle génération font largement appel aux matières plastiques modernes et plus particulièrement aux résines époxy. L'utilisation de la résine époxy, tant comme matériau de moulage que d'enrobage, permet en effet de réduire le nombre de pièces à un strict minimum et d'obtenir une compacité jamais atteinte jusqu'à présent avec les procédés conventionnels de fabrication et d'assemblage; la résine époxy confère en outre à l'ensemble des caractéristiques excellentes, tant sur le plan électrique que sur celui de la protection contre les agents atmosphériques.

Description des principaux appareils

Nous dirons seulement quelques mots des appareils utilisés dans les fonctions principales.

Contacteur KP 18

Les contacteurs utilisés pour la commutation traction-freinage, pour l'inversion du sens de marche ainsi que pour l'élimination des résistances additionnelles de freinage sont des appareils à commande électropneumatique, type KP 18. Ce type de contacteur couvre, dans ses différentes versions, toute la gamme des applications de traction en courant continu jusqu'à 3 kV inclusivement, avec des intensités de régime continu allant jusqu'à 800 A.

Le contacteur est essentiellement constitué d'une carcasse en résine époxy dans laquelle sont moulés le cylindre de commande pneumatique, la bobine de soufflage, le support de contact fixe et les pièces de fixation de l'appareil (fig. 22). L'électrovalve de commande est directement fixée au cylindre pneumatique.

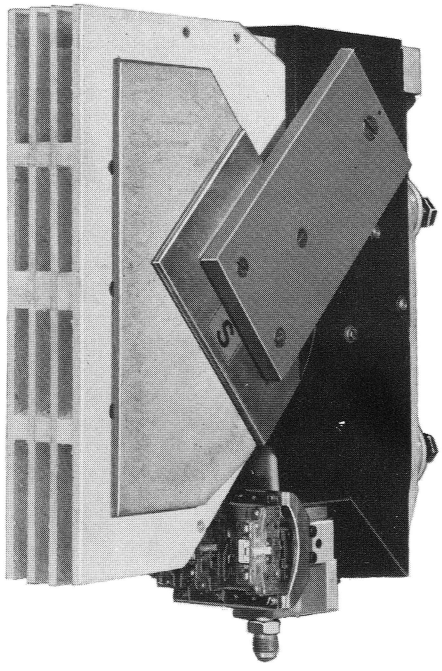


Fig. 22. - Contacteur KP 18.

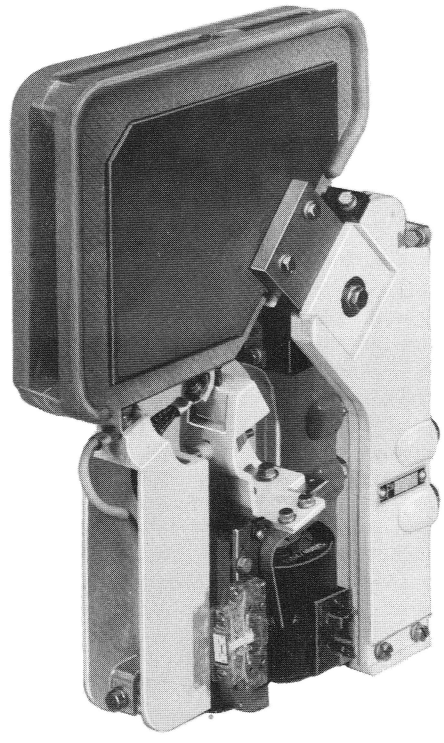


Fig. 23. - Contacteur KM 320.

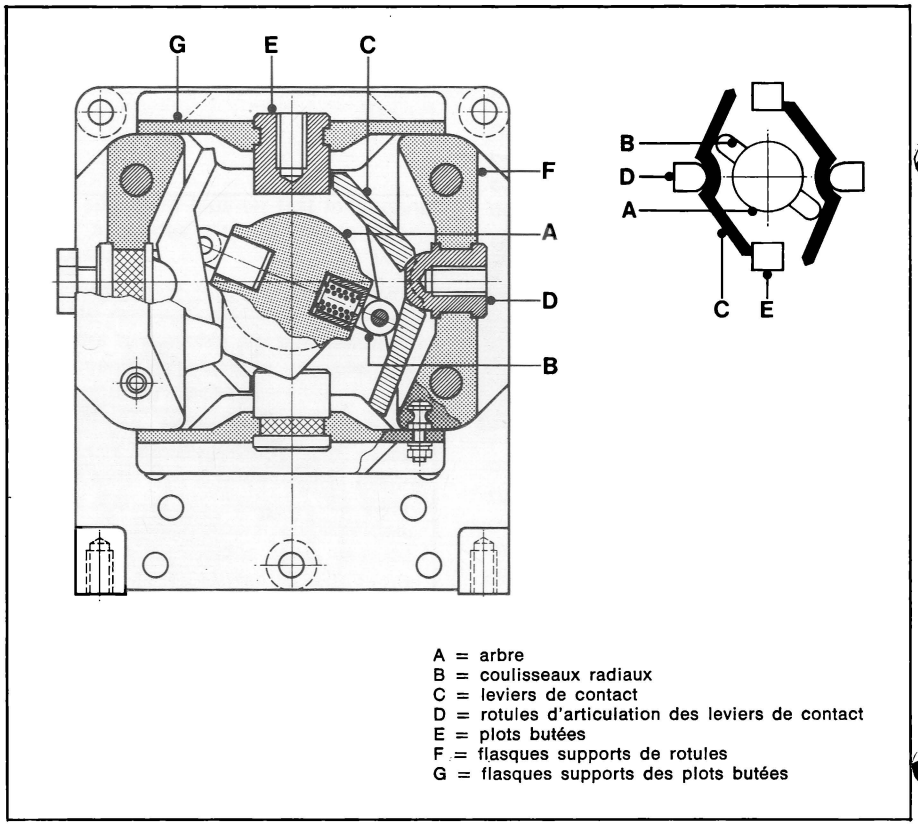


Fig. 24. - Inverseur à bascule.

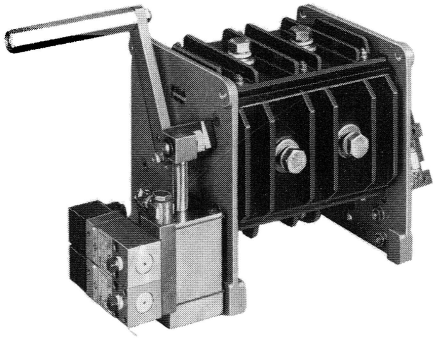


Fig. 25. - Inverseur IB 35.

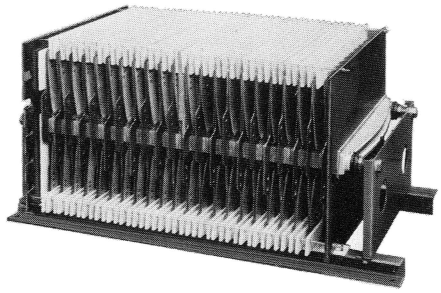


Fig. 26. - Résistances de freinage.

Le contacteur peut être équipé de plusieurs types de boîtes de soufflage selon l'utilisation prévue.

Les fers de champ peuvent également, selon l'application, être en fer doux (contacteur non polarisé) ou en acier spécial prémagnétisé (soufflage permanent permettant la coupure des faibles courants).

Contacteur KM 320

Les contacteurs de shuntage sont du type KM 320, à commande électromagnétique (fig. 23). Ce contacteur peut supporter une intensité nominale de 200 A.

Un appareil de la même famille, mais d'intensité nominale plus faible 60 A, le type KM 306, est utilisé pour les circuits auxiliaires 750 V : moteurs des groupes compresseur, convertisseur et ventilateur, chauffage, etc...

Inverseur à bascule

L'inverseur à bascule type IB 35 est utilisé dans l'équipement de puissance pour réaliser la commutation prise d'atelier/troisième rail.

Cet appareil (fig. 24) comporte essentiellement un arbre **A** moulé en résine époxy, entraînant des coulisseaux radiaux **B** qui actionnent chacun un levier de contact **C.** Ces leviers, pivotant en leur milieu sur les rotules **D**, viennent buter en leur extrémité sur des plots fixes **E.** Les rotules et les butées de contact sont moulées dans les flasques latéraux **F** et **G** en résine époxy.

Schématiquement parlant, on voit que chaque levier mobile réalise un contact tripolaire dont la rotule constitue le pôle commun tandis que les deux plots-butées constituent les deux autres pôles. Un appareil complet comprend deux « tranches » comportant chacune deux rotules, deux leviers et deux plots-butées, ce qui permet de réaliser la fonction complète d'inverseur de polarité.

L'isolation de l'appareil est prévue pour des circuits à 3 kV. Les contacts peuvent supporter en durée une intensité continue de 500 A. La commande est électropneumatique et/ou manuelle.

La figure 25 donne une vue d'ensemble de l'inverseur IB 35. On voit qu'il s'agit d'un appareil complètement fermé et présentant donc une excellente protection contre les agents atmosphériques. Il est d'un encombrement exceptionnellement réduit pour ses performances.

Résistances de freinage

Les résistances de freinage rhéostatique et les résistances additionnelles de freinage sont du type représenté à la figure 26.

Il s'agit de résistances de puissance massique élevée, prévues pour fonctionner avec une ventilation forcée.

Montage en coffres

Tout cet appareillage électromécanique est rassemblé dans des coffres prévus pour être suspendus sous le châssis de la voiture. De larges ouvertures que viennent obturer des portes en polyester armé auto-extinguible sont ménagées sur leurs faces latérales extérieures. Les coffres sont constitués d'éléments modulaires en tôles fines soudées, formant chacun un caisson autonome et assemblés entre eux par rivetage. Cette technique de construction permet d'obtenir un poids minimal allié à une grande rigidité. De plus la technique modulaire permet une adaptation aisée des coffres aux impératifs d'implantation sous le châssis.
Les résistances de freinage sont ventilées par le même air que celui qui a servi à refroidir les coffres du hacheur.

VIII. **INSTALLATION DES EQUIPEMENTS SUR VOITURES**

L'installation des équipements sur voiture a fait l'objet de longues études menées de concert avec le client, les constructeurs mécaniciens et l'Industrial design, de manière à concilier les divers impératifs :

— facilité de montage et démontage;
— commodité d'accès pour l'inspection et le dépannage;
— équilibrage des masses;
— esthétique de l'aspect extérieur;
— légèreté.

La figure 27 donne une vue panoramique de l'implantation réalisée pour le hacheur sous le châssis d'une des voitures.

On note la disposition « en série » du ventilateur, du hacheur et du bloc de résistances principales.

La figure 28 montre l'installation des boîtiers de régulation et des tableaux d'asservissement dans la cloison séparant la cabine du conducteur du compartiment voyageurs.

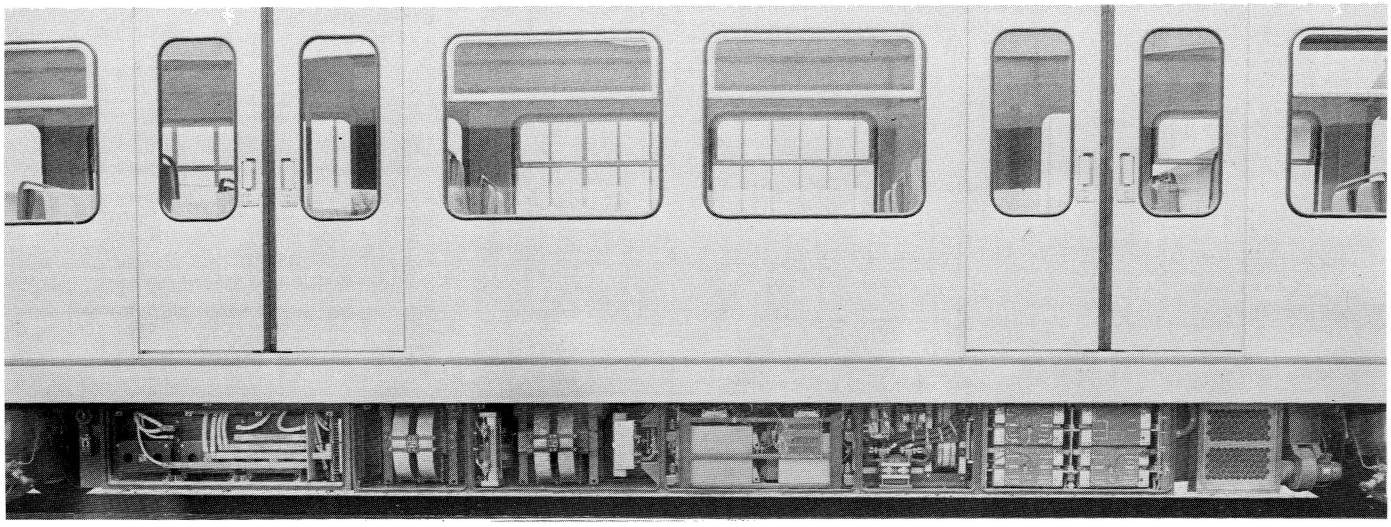


Fig. 27. - Ventilateur, hacheur et résistances montés sous une des 2 voitures.

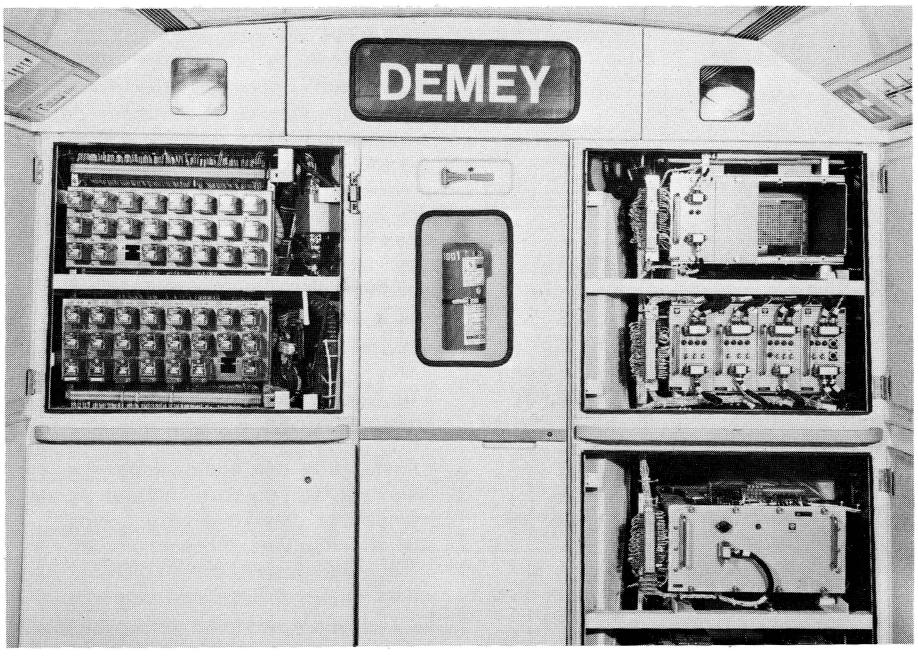


Fig. 28. - Boîtiers de régulation et tableaux d'asservissement.

CONCLUSION

Les pages qui précèdent ont montré comment les solutions développées pour les voitures du métro de Bruxelles rencontrent les souhaits du public et les impositions de l'exploitant. Nous avons aussi mis l'accent sur la parfaite adaptation du matériel à toutes les sollicitations prévisibles, dans le souci permanent de la haute fiabilité essentielle à l'exploitation du métro.

Il est intéressant de noter, à ce dernier propos, que nous ne nous sommes pas contentés d'effectuer sur les matériels tous les tests prescrits par les normes en vigueur; un équipement complet de présérie a été monté et câblé en usine et y a subi, pendant plusieurs mois, des essais simulant les conditions les plus sévères d'exploitation. Les enseignements tirés de ces essais ont été appliqués aux équipements de série alors en construction, ce qui a permis d'éviter nombre de « maladies de jeunesse ».

La mise au point définitive des équipements a été effectuée sur les voitures-mêmes circulant sur un tronçon de ligne mis par le client à la disposition des constructeurs; toutes les voitures y ont subi un « rodage » de plusieurs milliers de kilomètres.

L'inauguration, le 20 septembre 1976, de la première ligne du métro de Bruxelles a couronné cette entreprise de longue haleine qui témoigne du savoir-faire de l'industrie belge dans le matériel de transports, secteur-clé de son programme d'activités

Qu'il nous soit permis d'adresser nos vifs remerciements à la Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles pour la confiance qu'elle nous a témoignée et pour l'aide précieuse qu'elle nous a accordée à tous les stades de l'étude et de la réalisation d'un matériel de métro moderne et fonctionnel.

J. GALLOY.

BIBLIOGRAPHIE

[1] FANUEL A. / GALLOY J. / HOEYKENS H. : *L'équipement électrique des nouvelles voitures articulées du pré-métro de la STIB.* Revue ACEC 1973/1.

[2] GOUTHIÈRE J. : *Les hacheurs à thyristors en traction électrique.* Revue ACEC 1976/1-2.

[3] LE PRINCE J. : *Quelques problèmes de conception dans les machines à courant continu alimentées par semi-conducteurs.* Revue ACEC 1974/3-4.

[4] BAWIN P. : *Nomicacec, une isolation classe F pour moteurs à courant continu.* Revue ACEC 1972/2.

92418/0976/1/8/TD11 PRINTED IN BELGIUM D/1976/0125/11

92417/0976/0,85/8/TD11

PRINTED IN BELGIUM

D/1976/0125/7

TP 935-02.1

Extrait de ACEC-REVUE N° 1-2 / 1976

LES HACHEURS A THYRISTORS EN TRACTION ELECTRIQUE

J. GOUTHIERE

A MEMBER OF THE WESTINGHOUSE ELECTRIC GROUP

LES HACHEURS A THYRISTORS EN TRACTION ÉLECTRIQUE

INTRODUCTION

En 1970, nous avons publié dans notre Revue un article dans lequel était déjà développée la théorie des hacheurs à thyristors.
Nous reprenons à présent l'essentiel de cet exposé, revu et complété toutefois en différents points.

Dans les prochains numéros, nous décrirons deux applications importantes des hacheurs à thyristors:

— les voitures du métro de Bruxelles (STIB),
Revue ACEC 1976/3-4;
— les locomotives 7 000 ch de la SNCB,
Revue ACEC à paraître en 1977.

Automotrice quadruple de la S.N.C.B. équipée de hacheurs à thyristors.

I. AVANTAGES DU HACHEUR

Les hacheurs à thyristors se sont imposés dans le domaine de la traction à courant continu, en raison de nombreux avantages qu'ils présentent pour l'exploitant par rapport aux équipements électromécaniques traditionnels.

Le hacheur permet de faire varier *de façon continue* la tension aux bornes des moteurs de traction et élimine de ce fait complètement les variations brusques d'effort en démarrage et en freinage.

Il en résulte
— une douceur de démarrage et de freinage d'un niveau jamais atteint antérieurement, le critère en la matière étant ce que l'on appelle en jargon anglo-saxon, la « limitation du jerk ».
— une moindre sollicitation de l'adhérence autorisant, sans risque de patinage ou d'enrayage, les taux les plus élevés d'accélération et de décélération.

Le hacheur fait varier *sans perte* la tension aux bornes des moteurs. Ceci a pour conséquences immédiates un gain important d'énergie et une réduction appréciable des pointes de courant à fournir par le réseau d'alimentation. En outre, l'absence de pertes dans un rhéostat de démarrage autorise l'utilisation de moteurs définis à vitesse plus élevée qu'avec un équipement conventionnel, ce qui s'avère avantageux sous différents aspects.

Outre le freinage rhéostatique réalisé sur beaucoup d'équipements « classiques », le hacheur permet un *freinage à récupération* s'établissant rapidement et maintenant son efficacité jusqu'aux plus basses vitesses ce qui permet son utilisation comme frein de service.

Il importe d'attirer ici l'attention sur une particularité importante des équipements ACEC comparés à d'autres équipements à hacheur. Dans la plupart des équipements existants, si le réseau n'est pas en mesure d'absorber la totalité de l'énergie de freinage renvoyée par un train, le freinage à récupération est interrompu et on passe de façon irréversible, pour toute la durée du freinage en cours, au frein rhéostatique ou mécanique.

L'équipement ACEC par contre est conçu de telle manière qu'une tentative de freinage à récupération est faite à chaque cycle de hachage, c'est-à-dire de façon précise toutes les 5 millisecondes.
On renvoie ainsi au réseau à chaque cycle de hachage toute l'énergie qu'il est en mesure d'absorber durant cette période et on dissipe dans les résistances de freinage uniquement le solde de l'énergie de freinage que le réseau ne peut absorber au cours de ce cycle. Ce système, appelé *freinage mixte* est le seul qui permette d'exploiter convenablement les possibilités d'absorptions du réseau d'alimentation et d'obtenir un taux pratique de récupération élevé.

Il en résulte
— une économie de consommation d'autant plus importante que les stations sont rapprochées et le réseau accidenté ; (le gain global de consommation apporté par le hacheur est estimé pour un métro à 30 %, avantage qui, dans le contexte actuel de la crise de l'énergie, justifie largement à lui-seul le choix de ce type d'équipements) ;
— une réduction de la puissance à fournir et à transporter par le réseau d'alimentation et donc un moindre coût de celles-ci ;
— pour les réseaux de métro, une diminution sensible des frais à consentir pour la ventilation des tunnels.

De par sa nature même, le hacheur à thyristors est *purement statique* et les appareils électromécaniques subsistant dans l'équipement fonctionnent à vide et dès lors avec un minimum d'usure. Il en résulte par rapport aux équipements conventionnels une réduction décisive des frais d'entretien.

Le hacheur étant un dispositif électronique, fonctionne à des *vitesses électroniques*, ce qui permet de résoudre enfin parfaitement des problèmes restés jusqu'à présent sans solution satisfaisante. Nous citerons notamment :
— le problème de l'antipatinage : toute amorce de glissement est enrayée instantanément, ce qui permet en pratique de fonctionner sans danger à la limite de l'adhérence disponible ;
— le problème de la protection contre les défauts dans le circuit de puissance : le hacheur, par blocage des thyristors principaux, intervient en moins de 5 millisecondes et peut ainsi étouffer « dans l'œuf » une surintensité en train de se produire.
C'est le cas par exemple pour les flashes aux moteurs de traction qui sont maîtrisés avant qu'il en résulte la moindre destruction.

Disons enfin que, du fait de *l'absence d'interface électronique - électronique*, l'équipement à thyristors se prête particulièrement à l'automatisation de la conduite, contribuant par là à soulager le personnel d'exploitation et permettant sans difficultés une optimisation du trafic.

II. PRINCIPE DU HACHEUR

Un hacheur est un équipement qui, alimenté à partir d'une source à tension continue fixe, peut fournir à une charge une tension continue variable. Le schéma de la figure 1 en montre le principe de fonctionnement.

Un interrupteur H est fermé régulièrement, à des intervalles de temps égaux à T et reste fermé pendant un temps δT avec $0 \leqslant \delta \leqslant 1$.
On appelle T la période de hachage et δ le rapport cyclique.
La charge est ainsi soumise périodiquement à une tension égale à la tension d'alimentation pendant une durée δT et à une tension nulle pendant le reste de la période $(1 - \delta)$ T. Si la charge est inductive — ce qui est notamment le cas lorsqu'elle est constituée de moteurs à courant continu — le courant de charge I_m ne peut être interrompu au temps $t = \delta T$ lorsqu'on ouvre l'interrupteur. C'est la raison pour laquelle une diode D_m, appelée diode de déversement, est branchée en parallèle sur la charge; elle permet la circulation du courant dans la charge lorsque l'interrupteur est ouvert.
Si la constante de temps L_m / R_m de la charge est suffisamment grande vis-à-vis de la période de hachage, le courant de charge ne s'annule pas. Il augmente quand l'interrupteur H est fermé et décroît quand H est ouvert.
Dans ce dernier cas, la tension aux bornes de la charge est faiblement négative et est égale à la chute de tension dans la diode de déversement. On peut toutefois assimiler cette très faible tension négative à une tension nulle.

La tension moyenne aux bornes de la charge vaut δE : c'est cette tension qui détermine le courant moyen circulant dans la charge (si cette dernière est un moteur, il faut évidemment tenir compte de la f.c.é.m. du moteur). En réglant le rapport cyclique δ, on peut contrôler soit la tension moyenne aux bornes de la charge, soit le courant moyen qui la traverse, soit encore un autre paramètre. C'est ainsi que si la charge est un moteur de traction, on peut établir une boucle de régulation qui fixe automatiquement le rapport cyclique δ à partir d'une consigne du couple moteur et de la mesure directe de ce couple.

Le hacheur permet donc, à partir d'une tension continue fixe, d'alimenter une charge à tension continue variable. En se référant aux formes d'ondes de la figure 1, on constate que cette tension variable est réalisée en « hachant » la tension d'entrée en impulsions rectangulaires de durée δT. Cela justifie l'appellation de « hacheur » donnée à ce type d'équipement.

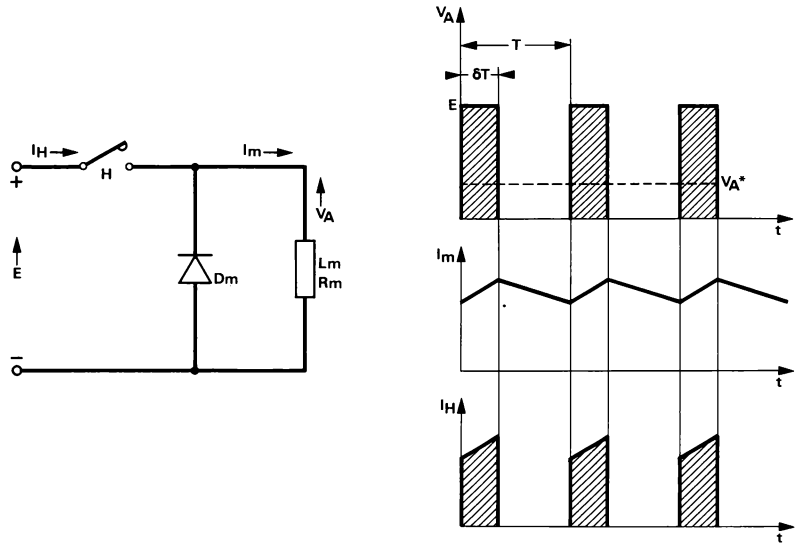


Fig. 1. - Schéma de principe d'un hacheur.

Il convient de noter que l'interrupteur H peut être commandé suivant trois modes. Nous avons décrit ci-dessus le *premier* mode : on adopte une fréquence de hachage fixe et on fait varier de 0 à T la durée de fermeture de l'interrupteur.

Le *deuxième* mode consiste à choisir une durée de fermeture T1 fixe et à faire varier la fréquence de hachage.

Quant au *troisième* mode, il résulte d'une combinaison des deux précédents : on utilise conjointement une fréquence variable et une durée de fermeture variable, la fréquence étant liée au rapport cyclique suivant une loi adéquate.

La figure 2 illustre les différents modes de commande, en donnant pour chacun d'eux l'évolution de la tension de sortie.

L'interrupteur H devant fonctionner à une fréquence $f = 1 / T$ suffisamment élevée pour que le courant dans la charge présente une faible ondulation (sans imposer néanmoins une self de charge trop importante), il faut remplacer l'interrupteur mécanique H de la figure 1 par un interrupteur statique. Celui-ci sera un thyristor qu'il sera aisé d'allumer par sa grille de commande au moment voulu. L'extinction de ce thyristor sera réalisée selon le principe de la commutation forcée, c'est-à-dire à l'aide d'une énergie stockée dans un circuit dit « d'extinction » spécialement prévu à cette fin.

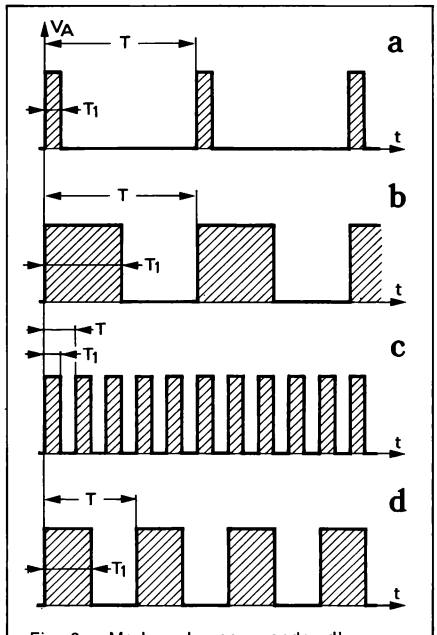


Fig. 2. - Modes de commande d'un hacheur
a : schéma de départ $T_1 = 0{,}1\ T$
b : T reste constant; $T_1 = 0{,}5\ T$
c : T_1 reste constant; $T_1 = 0{,}5\ T$
d : T et T_1 sont variables, mais $T_1 = 0{,}5\ T$

III. SCHEMA D'UN HACHEUR A THYRISTORS

Le schéma du hacheur à thyristors et les principales formes d'ondes du montage sont représentés à la figure 3.

Description du schéma

Ce schéma comporte les mêmes éléments que celui de principe (fig. 1) : l'interrupteur H y est remplacé par une cellule de découpage comprenant les éléments semi-conducteurs Th1, D1, Th2, D2 et le circuit oscillant (L, C).

Th1 est appelé thyristor principal et Th2, thyristor d'extinction ou thyristor auxiliaire. Un dipôle, constitué de la diode D3 en série avec la résistance R3, est placé en parallèle sur le condensateur C.

Dans un but de simplification, le fonctionnement de ce montage — principalement les processus d'allumage et d'extinction du thyristor principal — est décrit en régime établi, en supposant la constante de temps de la charge très grande vis-à-vis de la période de hachage.

A l'instant initial $t = 0$, on allume le thyristor principal Th1 au moyen d'une impulsion sur sa grille de commande. La tension d'alimentation E est appliquée d'une part aux bornes de la charge et d'autre part, aux bornes du circuit oscillant LC par l'intermédiaire de la diode D2. Le condensateur C va se charger; la charge accumulée sera libérée ultérieurement lors du processus d'extinction de Th1. Le courant I_L qui circule dans le circuit d'extinction peut se calculer à l'aide de l'équation :

$$E = L \frac{d(-I_L)}{dt} + \frac{1}{C} \int_o^t (-I_L)\, dt + V_{C,0} \quad (1)$$

En tenant compte des conditions initiales $V_{C,0} = 0$ et $I_L(t = 0) = 0$, on trouve en résolvant l'équation (1) qui néglige les pertes du circuit oscillant LC :

$$(-I_L) = E \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_o t$$

$$V_C = E\ (1 - \cos \omega_o t)$$

$$\text{avec } \omega_o^2 = \frac{1}{LC}$$

A l'instant $t = \pi / \omega_o$, le courant I_L vaut zéro et a tendance à changer de sens. Comme le thyristor Th2 n'est pas conducteur à ce moment, le courant I_L reste nul et la tension aux bornes du condensateur vaut 2E.

Le processus de charge du condensateur C est ainsi terminé à l'instant π / ω_o; il est

préparatoire à l'extinction ultérieure de Th1.

Changeant l'origine des temps, nous appellerons $t = 0$ l'instant où on allume le thyristor auxiliaire Th2 afin de libérer la charge stockée par le condensateur C. L'allumage de Th2 provoque la fermeture d'un circuit constitué par le condensateur C chargé à 2E, la self L, le thyristor Th2, le dipôle constitué de Th1 et D1, et enfin la source de tension E.

Un courant, d'allure sinusoïdale, s'établit alors dans le circuit d'extinction. Les composants de ce circuit sont dimensionnés de telle sorte que l'amplitude maximale de I_L soit plus grande que le courant I_m circulant dans la charge.

De $t = 0$ à $t = t_o$ défini comme le moment où I_L vaut I_m pour la première fois, le courant diminue progressivement dans le thyristor Th1 jusqu'à valoir zéro à l'instant $t = t_o$.
A partir de cet instant, un courant égal à $(I_L - I_m)$ circule dans la diode D1 jusqu'à l'instant $t = t1$ où I_L vaut I_m pour la seconde fois. A partir de $t = t1$, le dipôle constitué de Th1 et D1 cesse d'être conducteur, pour autant que l'intervalle de temps $(t1 - t_o)$ soit supérieur au temps d'inversion t_i du thyristor principal Th1.

A l'instant $t = t1$, la tension aux bornes du condensateur C étant encore positive, la diode de déversement D_m est polarisée par une tension inverse et n'est pas conductrice. On assiste, dès lors, à une décharge du condensateur C par le courant I_m. Cette décharge à courant constant se prolonge jusqu'à l'instant $t = t2$ à partir duquel la tension V_C change de signe.

A partir de l'instant $t = t2$, un nouveau circuit de décharge du condensateur C doit être envisagé. En effet, lorsque la polarité de la tension V_C tend à s'inverser, une partie du courant de charge ou son entièreté peut se refermer par la diode D_m. Dès que la tension V_C devient négative, un courant peut circuler à travers R3 et D3. La valeur de la résistance R3 étant choisie pour que le circuit L.C.R3 soit à l'amortissement critique, le courant I_L et la tension V_C s'annulent rapidement. A l'instant $t3$, le processus d'extinction du thyristor Th1 est terminé.

Le cycle qui vient d'être décrit, recommence au prochain allumage du thyristor principal avec des conditions initiales qui sont celles postulées au départ :
$I_L\ (t = 0) = 0,\ V_{C,o} = 0.$

Avantages principaux du schéma utilisé

La tension appliquée à la charge ne peut jamais, même transitoirement, dépasser la tension d'alimentation. Cette propriété est très intéressante lorsqu'on utilise des hacheurs à haute tension continue pour l'alimentation de moteurs, par exemple en traction électrique dans les réseaux à 1,5 ou 3 kV cc.

La tension directe appliquée aux thyristors n'excède jamais la tension d'alimentation, à l'exception de la surtension transitoire apparaissant lors du blocage des thyristors. Cette surtension peut être limitée à l'aide d'un circuit (R, C) connecté en parallèle sur chacun des thyristors.

La tension inverse appliquée aux thyristors est celle d'une diode passante, ce qui est favorable à la protection des thyristors en régime dynamique.

Les courants d'extinction des thyristors sont appliqués de façon progressive et limitée, ce qui les préserve des détériorations.

Variantes

Le schéma décrit ci-dessus peut aisément s'utiliser avec le thyristor Th2 et la diode D2 inversés comme représenté à la figure 4. Le fonctionnement de ce nouveau schéma se comprend aisément par analogie avec celui du schéma de base.

Ses deux principaux avantages sont :
— une sollicitation moindre des thyristors principaux au moment de leur allumage, car la charge du condensateur d'extinction n'a plus lieu à cet endroit ;
— la possibilité d'utiliser un hacheur en conduction totale, les thyristors principaux étant allumés en permanence.

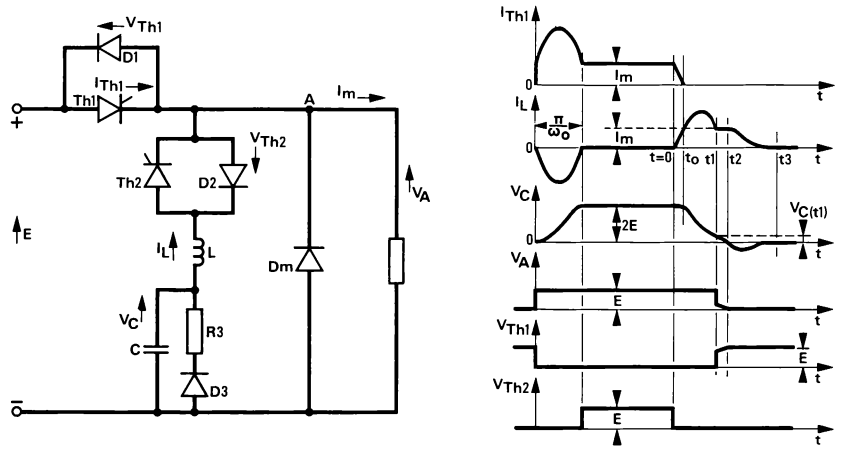


Fig. 3. - Schéma de principe d'un hacheur à thyristors. Formes simplifiées des ondes de courants et de tensions dans ce hacheur.

Son inconvénient est de ne pas profiter de l'ondulation aux bornes du condensateur du filtre d'entrée — qu'il est presque toujours nécessaire de prévoir entre le hacheur et la source d'alimentation — pour favoriser la charge et la décharge du condensateur d'extinction.

Une autre variante du schéma de base est représentée à la figure 5. Comparé aux précédents, ce schéma procure une sollicitation moindre de la source (c'est-à-dire, en pratique, du condensateur de filtrage) qui n'est plus traversée par les courants du circuit d'extinction et une sollicitation moindre du condensateur d'extinction C au point de vue de la tension de crête (E au lieu de 2E).

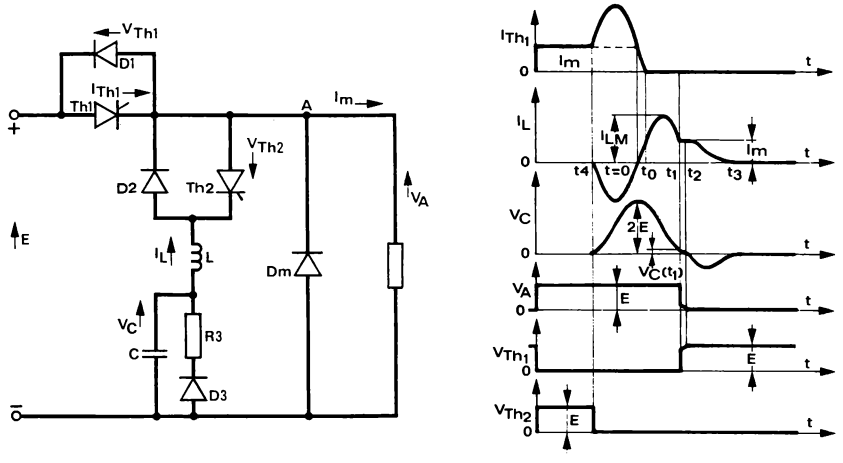


Fig. 4. - Variante du schéma de principe d'un hacheur à thyristors (inversion de D2 et Th2). Formes simplifiées des ondes de courants et de tensions.

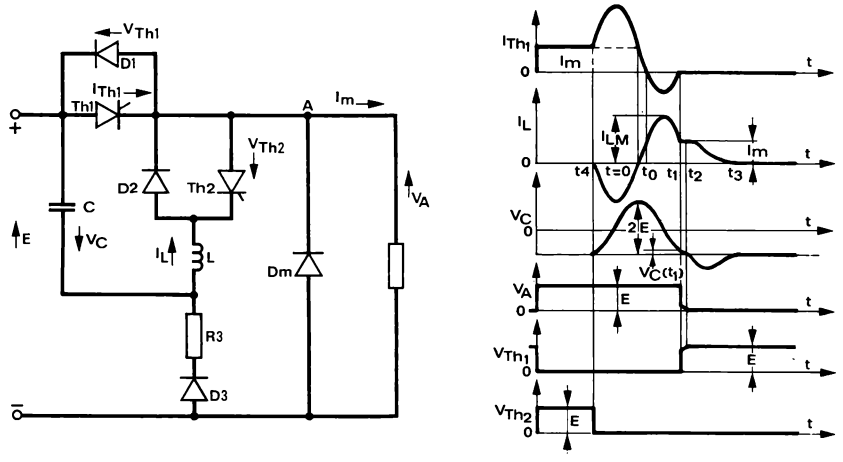


Fig. 5. - Autre variante du schéma de principe (modification du condensateur C). Formes simplifiées des ondes de courants et de tensions.

IV. CHOIX DE LA FREQUENCE DE HACHAGE

Pour choisir judicieusement la fréquence de travail, il faut envisager son influence sur le hacheur, sur la charge et sur la source d'alimentation.

Influence de la fréquence sur le hacheur

Pour réaliser avec sécurité le processus complet de commutation du hacheur, il faut un temps fixe minimal, égal à 4 ou 5 fois le temps d'inversion t_i des thyristors utilisés. Ce temps minimal, appelé « temps mort », constitue à la fois les « butées » minimale et maximale du rapport cyclique δ. En augmentant la fréquence de hachage, on réduit la zone d'excursion de δ dans la période. Si la « butée » maximale est grande, une partie non négligeable de l'énergie de la source ne peut pas être transmise à la charge ; si la butée minimale est grande, la tension minimale de sortie peut être trop élevée, notamment lorsqu'on désire effectuer le démarrage d'un moteur.

Pour réduire la valeur des « butées », on peut travailler à deux ou plusieurs fréquences dans des zones de δ différentes, par exemple à la fréquence $f1$ pour $\delta \leqslant 0{,}1$ ou $\delta \geqslant 0{,}9$ et à la fréquence $f2 > f1$ pour $0{,}1 < \delta < 0{,}9$.

Une autre considération qui milite en faveur d'une fréquence peu élevée est la réduction des pertes dans le hacheur, dont plusieurs sont proportionnelles à la fréquence de hachage :
— les pertes à la commutation dans les semi-conducteurs ;
— les pertes dans les circuits (R, C) de protection des semi-conducteurs ;
— les pertes dans le circuit oscillant d'extinction.

Influence de la fréquence sur la charge

Nous avons supposé jusqu'ici que la constante de temps de la charge était suffisamment grande vis-à-vis de la période de hachage pour assurer un courant quasi constant dans la charge.

Toutefois, lorsque la charge est constituée par un moteur, il faut s'assurer que l'ondulation du courant ne dépasse pas ce qui est admissible pour un moteur à courant continu, compte tenu des pertes par échauffement dues à la composante alternative du courant et compte tenu de la bonne commutation du moteur.

Une autre raison peut amener à réduire l'ondulation du courant. Le hacheur doit être dimensionné pour couper le courant maximal de la charge ; plus ce courant est

élevé, plus le dispositif est coûteux.
En régime établi, on peut calculer l'ondulation de courant de charge en se référant à la figure 6, où la charge est constituée par un moteur caractérisé par une self L_m et une résistance R_m.

Les calculs montrent que l'ondulation est nulle pour $\delta = 0$ et $\delta = 1$ et maximale pour $\delta = 0{,}5$.

$$(\Delta I_m)\ \max = \frac{E}{R_m}\ \text{tangh}\ \frac{R_m \cdot T}{4\,L_m} \simeq \frac{ET}{4\,L_m}$$

L'amplitude de l'ondulation crête à crête du courant dans la charge est d'autant plus grande que la fréquence de hachage est faible et que la self de la charge est petite.

Si le hachage s'effectue à trop basse fréquence, il faut prévoir, en série avec la charge, une self lourde, encombrante et onéreuse.

Influence de la fréquence sur la source d'alimentation

Nous avons admis jusqu'à présent que l'alimentation était une source de tension E, d'impédance interne nulle (par exemple une batterie) et que la source ne posait aucun problème au hacheur. Mais dans le cas plus général d'une alimentation par ligne caténaire ou par troisième rail comme dans les réseaux de traction, il est indispensable de prévoir entre le hacheur et l'organe de captation une cellule de filtrage, composée, dans sa forme la plus simple, d'une self L_e et d'un condensateur C_e.

Rôle du condensateur C_e

Le condensateur C_e rend possible le soutirage, par le hacheur, de courants pulsés et ce, malgré la présence de la self du réseau ; en plus de son rôle de réservoir d'énergie, il réduit les surtensions présentes, de manière à les ramener à un niveau acceptable à l'entrée du hacheur.

Ces surtensions peuvent avoir trois origines :

- surtensions de manœuvre dans la ligne d'alimentation ;
- surtensions provoquées par la coupure du courant de charge dans les thyristors principaux. La coupure étant réalisée très rapidement par les thyristors, l'énergie magnétique emmagasinée dans la self de ligne et dans celle d'entrée se transforme en énergie potentielle aux bornes du condensateur C_e qui voit sa tension s'élever ;
- surtensions provoquées par le fonctionnement normal du hacheur : en effet, en se référant à la figure 7 et en supposant constant le courant de charge, on peut déterminer l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur C_e.

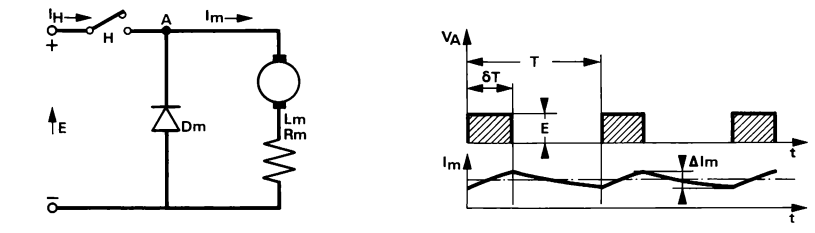


Fig. 6. - Schéma de principe d'un hacheur alimentant un moteur. Courbes simplifiées des variations de tension et d'intensité.

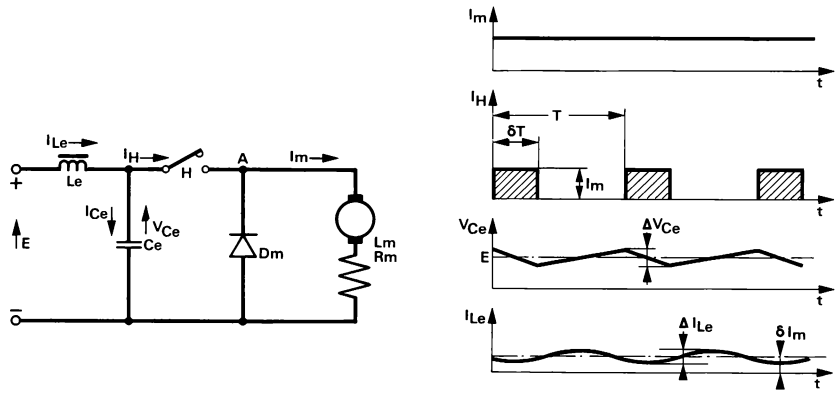


Fig. 7. - Schéma de principe du hacheur avec filtre d'entrée. Ondulation de la tension aux bornes du condensateur C_e et du courant dans la self L_e.

Posons

$$\omega_e = 2\,\pi f_e = \frac{1}{\sqrt{L_t \cdot C_e}}$$

avec

$$L_t = L_{réseau} + L_e$$

Si la fréquence de hachage est plus petite que la fréquence de résonance f_e, il y a plusieurs extremums de la tension V_{Ce} pendant une demi-période de hachage.

L'ondulation crête à crête maximale de la tension aux bornes du condensateur C_e vaut dans ce cas

$$(\Delta V_{Ce})\ \max = \frac{2\,I_m}{\omega_e \cdot C_e} \cdot \frac{1}{\sin \pi \dfrac{\omega_e}{\omega}}$$

Si la fréquence de hachage est plus grande que la fréquence de résonance f_e, l'ondulation est maximale pour $\delta = 0{,}5$ et vaut

$$(\Delta V_{Ce})\ \max = \frac{I_m}{\omega_e \cdot C_e}\ \text{tg}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega_e}{\omega}\right)$$

La figure 8 montre l'influence du choix du rapport $\omega_e / \omega = f_e / f$ sur l'ondulation de tension aux bornes du condensateur C_e. On choisit généralement $f_e / f < 0{,}5$ pour limiter ainsi l'ondulation de tension à une valeur raisonnable, tout en évitant de la rendre trop sensible aux variations de la self L_t (cette self comprend la self du réseau qui, en traction électrique, est un paramètre essentiellement variable en fonction de la distance séparant les véhicules des sous-stations d'alimentation).

Pour des rapports $f_e / f < 1/3$, on peut, avec une approximation suffisante, simplifier l'expression ci-dessus, ce qui donne :

$$(\Delta V_{Ce}) \text{ max} = \frac{I_m \cdot T}{4\, C_e} \qquad (3)$$

On constate que, pour une même ondulation de tension, la capacité du condensateur C_e sera d'autant plus faible que la fréquence de hachage est élevée.

Rôle de la self L_e

La self L_e réduit l'ondulation du courant de ligne à une amplitude suffisamment basse pour ne pas perturber d'autres utilisateurs. Cela est particulièrement important en traction électrique où la présence de courants alternatifs dans les rails peut perturber les circuits de signalisation ou de télécontrôle.

Dans le cas où $f_e / f < 0{,}5$, l'ondulation crête à crête du courant I_{Le} est maximale pour $\delta = 0{,}5$ et vaut

$$(\Delta I_{Le}) \text{ max} = I_m \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega_e}{\omega}\right)} - 1 \right]$$

L'influence du rapport ω_e / ω sur l'ondulation de courant est montrée à la figure 9.

Comme précédemment pour des rapports $f_e / f < 1/3$, on peut simplifier l'expression précédente et écrire

$$(\Delta I_{Le}) \text{ max} = \frac{I_m \cdot T^2}{32\, L_t\, C_e} \qquad (4)$$

Pour une même ondulation de courant, la valeur de la self L_e sera d'autant plus petite que la fréquence de hachage est élevée.

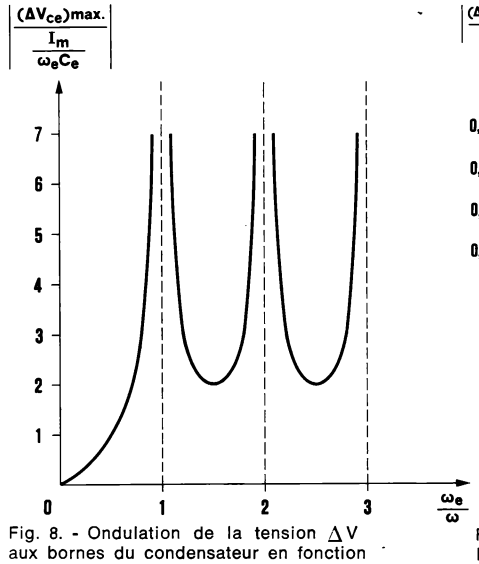


Fig. 8. - Ondulation de la tension ΔV aux bornes du condensateur en fonction du rapport ω_e/ω.

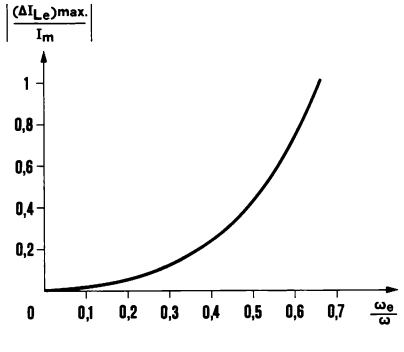


Fig. 9. - Ondulation du courant ΔI dans la self L_e en fonction du rapport ω_e/ω.

V. ENTRELACEMENT DES HACHEURS

Le choix de la fréquence résulte d'un compromis entre les impératifs du hacheur, de l'utilisation et de la source d'alimentation.
Pour réduire les dimensions et le coût de la cellule de filtrage d'entrée et de la self de lissage, on a intérêt à faire travailler le hacheur à la fréquence la plus élevée possible. On est toutefois limité dans cette voie par les caractéristiques propres des thyristors.

Une solution très intéressante à ce problème du choix de la fréquence est l'entrelacement des hacheurs. Elle consiste à utiliser deux ou plusieurs hacheurs qui fonctionnent à la même fréquence, mais dont les commandes sont judicieusement déphasées. L'entrelacement des hacheurs permet de solliciter la charge et la source d'alimentation à une fréquence multiple de celle de hachage.
Nous limiterons notre étude à l'entrelacement de deux hacheurs; elle peut être adaptée très facilement à un entrelacement d'ordre supérieur.

Entrelacement sans couplage magnétique

Ce système est repris au schéma de la figure 10. A titre exemplatif, cette figure donne aussi les différentes formes d'ondes de tension et de courant.

Deux hacheurs distincts, représentés par les interrupteurs H1 et H2, alimentent une charge commune à partir d'une source commune. Chaque hacheur qui fournit la moitié du courant à la charge travaille à la même fréquence $f = 1 / T$, mais les deux commandes sont déphasées de 180°. Une self de lissage L_s^* est placée en série avec chaque hacheur et les deux selfs L_s^* ne sont pas couplées magnétiquement. Avec cette disposition, la cellule de filtrage et la charge voient une sollicitation à la fréquence $2f$.

Ondulation du courant dans la charge

• En régime établi et en négligeant les pertes ohmiques, l'ondulation crête à crête du courant dans la charge est donnée par

$$(\Delta I_m) = \frac{E\,T\,\delta'\,(1 - 2\,\delta')}{L_s^* + 2\,L_m}$$

avec $\delta' = \delta$ pour $\delta \leqslant 0{,}5$
$\delta' = (1 - \delta)$ pour $\delta \geqslant 0{,}5$.

Cette ondulation est nulle pour $\delta = 0$, $\delta = 0{,}5$, $\delta = 1$; elle est maximale pour $\delta = 0{,}25$ ou $\delta = 0{,}75$, avec une valeur de

$$(\Delta I_m)\ \text{max} = \frac{ET}{8\,(L_s^* + 2\,L_m)} \quad (5)$$

• Considérons maintenant la même charge alimentée par un hacheur unique travaillant à la même fréquence f que chacun des deux hacheurs entrelacés. Si, dans le cas du hacheur unique, on place une self de lissage L_s calculée de façon à garder la même énergie magnétique que dans le montage entrelacé, c'est-à-dire si $L_s = L_s^* / 2$, l'ondulation crête à crête du courant dans la charge vaut

$$(\Delta I_m)\ \text{hach. unique} = \frac{2\,ET}{L_s^* + 2\,L_m}\,\delta\,(1 - \delta)$$

La figure 11 montre l'évolution de l'ondulation du courant I_m en fonction du rapport cyclique pour les deux montages. En conservant la même énergie magnétique pour les selfs de lissage, l'ondulation maximale de courant est quatre fois plus faible avec deux hacheurs entrelacés. Autrement dit, pour une même ondulation du courant de charge, l'entrelacement permet de réduire la self de lissage.

Ondulation du courant dans chaque hacheur

L'ondulation crête à crête du courant dans chaque hacheur est maximale pour $\delta = 0{,}5$ et vaut

$$(\Delta I1)\ \text{max} = (\Delta I2)\ \text{max} = \frac{E\,T}{4\,L_s^*}$$

Cette formule met en évidence le fait que, dans l'entrelacement sans couplage magnétique, on ne profite pas de la self de la charge pour limiter l'ondulation de courant dans les deux hacheurs. Chaque circuit d'extinction devra donc être dimensionné pour contrôler un courant égal à

$$\frac{I_m}{2} + \frac{E\,T}{8\,L_s^*}$$

Dimensionnement du filtre d'entrée (L_e, C_e)

Si la fréquence de hachage est supérieure à la moitié de la fréquence de résonance du filtre, l'ondulation crête à crête de la tension V_{Ce} et celle du courant I_{Le} sont maximales et identiques pour $\delta = 0{,}25$ et $\delta = 0{,}75$.

Seule diffère l'amplitude de la composante continue de courant dans la self L_e; cette

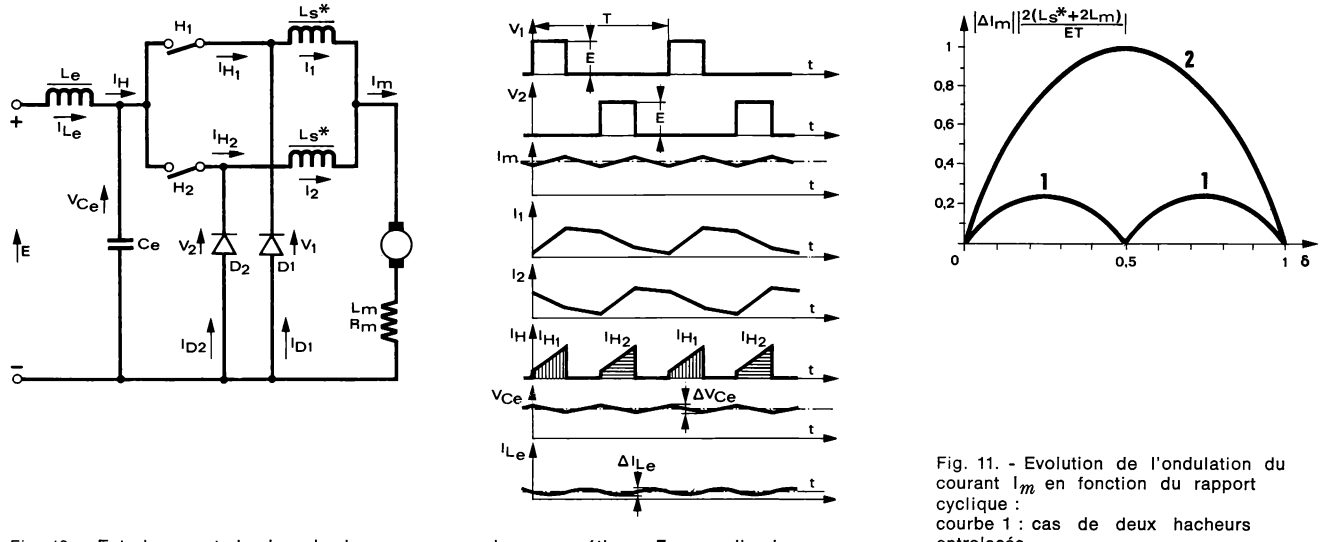


Fig. 10. - Entrelacement de deux hacheurs sans couplage magnétique. Formes d'ondes pour $\delta = 0{,}25$ et $L^*_s = 2\,L_m$

Fig. 11. - Evolution de l'ondulation du courant I_m en fonction du rapport cyclique :
courbe 1 : cas de deux hacheurs entrelacés
courbe 2 : cas d'un hacheur unique.

amplitude vaut $I_m / 4$ pour $\delta = 0{,}25$ et $3\, I_m / 4$ pour $\delta = 0{,}75$.

$$(\Delta V_{Ce})\ \text{max} \simeq \frac{I_m \cdot T}{16\, C_e} \qquad (6)$$

$$(\Delta I_{Le})\ \text{max} \simeq \frac{I_m \cdot T^2}{256\, C_e\, (L_{réseau} + L_e)} \qquad (7)$$

En comparant les équations (3) (4) (6) (7), on constate que le même filtre d'entrée, utilisé avec un hacheur unique (fonctionnant à la fréquence f et alimentant une même charge) donnerait lieu à une ondulation maximale de tension quatre fois plus grande et une ondulation maximale de courant huit fois plus grande.

Conclusion

Par rapport au hacheur unique, l'entrelacement de hacheurs sans couplage magnétique présente l'avantage de réduire sensiblement les dimensions du filtre d'entrée et de la self de lissage.
Malheureusement, cet avantage est compromis par une ondulation de courant importante dans les hacheurs, ce qui nécessite un surdimensionnement de la branche d'extinction de chaque hacheur et, dans une moindre mesure, des branches principales.

Entrelacement avec couplage magnétique

Cette variante est reprise au schéma de la figure 12, ainsi que les différentes formes d'ondes de tension et de courant. Deux hacheurs, représentés par les interrupteurs H1 et H2, alimentant une charge commune à partir d'une source commune.

Chaque hacheur qui fournit la moitié du courant à la charge, travaille à la même fréquence $f = 1 / T$, mais les deux commandes sont déphasées de 180°. Une self de lissage L^* est placée en série avec chaque hacheur et les deux selfs L^* sont couplées magnétiquement pour former une self totale $L = 2\,(L^* + M)$ où M est l'inductance mutuelle entre les deux selfs L^* ($0 \leqslant M \leqslant L^*$).
Une self de lissage additionnelle L_{cc} est placée en série avec la charge.
Dans ce montage aussi, la cellule de filtrage et la charge voient une sollicitation à la fréquence $2f$.

Ondulation du courant dans la charge

En régime établi et en négligeant les pertes ohmiques, l'ondulation crête à crête du courant dans la charge est donnée par

$$(\Delta I_m) = \frac{E\, T\, \delta'\, (1 - 2\,\delta')}{2\, (L_{cc} + L_m)}$$

avec $\delta' = \delta$ pour $\delta \leqslant 0{,}5$
$\delta' = (1 - \delta)$ pour $\delta \geqslant 0{,}5$.

Cette ondulation est nulle pour $\delta = 0$, $\delta = 0{,}5$ et $\delta = 1$; elle est maximale pour $\delta = 0{,}25$ ou $\delta = 0{,}75$ avec une valeur de

$$(\Delta I_m)\ \text{max} = \frac{E\, T}{16\, (L_{cc} + L_m)} \qquad (8)$$

En comparant les équations (5) et (8), on constate que pour limiter l'ondulation de courant dans la charge à la même valeur pour les deux montages entrelacés, on doit avoir : $L_{cc} = L_s^* / 2$, c'est-à-dire la même énergie magnétique pour la self L_{cc} que pour les deux selfs L_s^* de l'entrelacement sans couplage magnétique.

Ondulation du courant dans chaque hacheur

Si $L^* < (L_m + L_{cc})$, l'ondulation crête à crête du courant dans chaque hacheur est maximale pour $\delta = 0{,}5$, avec une valeur de

$$(\Delta I1)\ \text{max} = (\Delta I2)\ \text{max} = \frac{E\, T}{8\, L^*}$$

Si $L^* > (L_m + L_{cc})$, l'ondulation maximale a lieu pour deux valeurs du rapport cyclique

$$\delta = \frac{(L_m + L_{cc}) + L^*}{4\, L^*}$$

ou

$$\delta = \frac{3\, L^* - (L_m + L_{cc})}{4\, L^*}$$

et a pour valeur :

$$(\Delta I1)\ \text{max} = (\Delta I2)\ \text{max} = \frac{E\, T}{32}\, \frac{[L^* + (L_m + L_{cc})]^2}{L^{*2}\, (L_m + L_{cc})}$$

La figure 13 représente l'évolution de $(\Delta I1)$ ou $(\Delta I2)$ en fonction du rapport cyclique pour diverses valeurs du rapport

$$\frac{L_m + L_{cc}}{L^*}$$

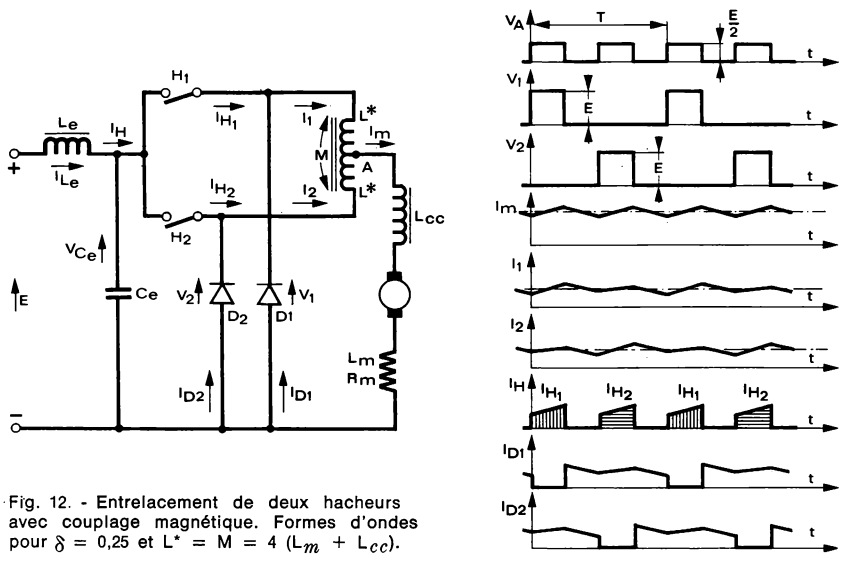


Fig. 12. - Entrelacement de deux hacheurs avec couplage magnétique. Formes d'ondes pour $\delta = 0{,}25$ et $L^* = M = 4\,(L_m + L_{cc})$.

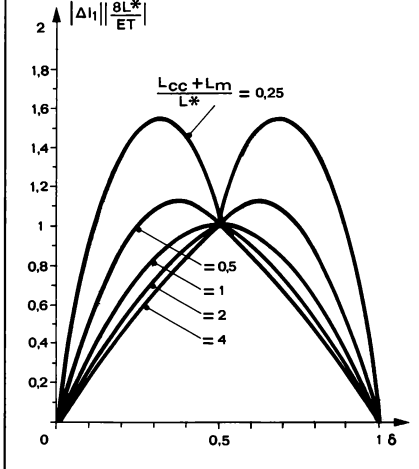


Fig. 13. - Evolution de ΔI_1 en fonction du rapport cyclique pour diverses valeurs du rapport $(L_m + L_{cc})/L^*$.

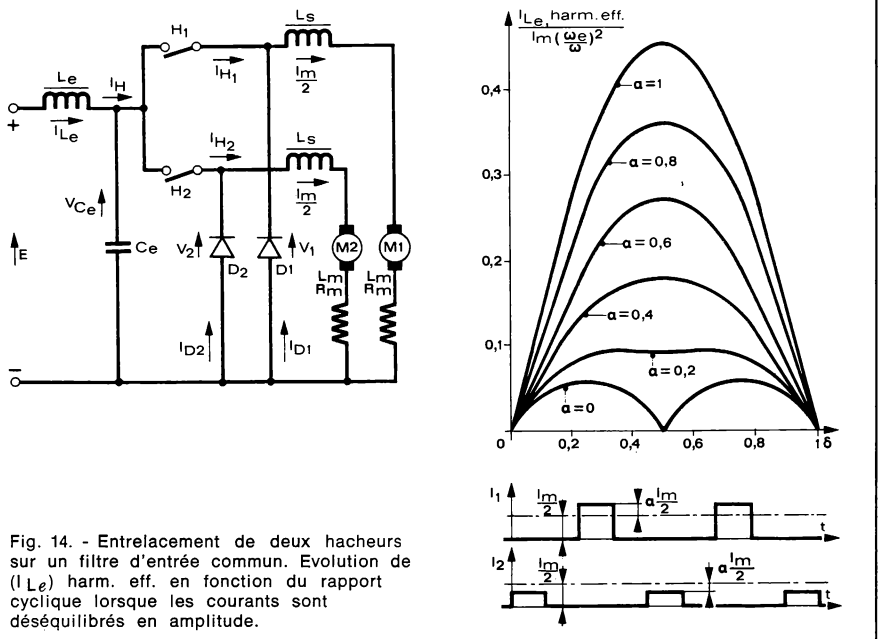


Fig. 14. - Entrelacement de deux hacheurs sur un filtre d'entrée commun. Evolution de (I_{Le}) harm. eff. en fonction du rapport cyclique lorsque les courants sont déséquilibrés en amplitude.

Dimensionnement du filtre d'entrée (L_e C_e)

Les résultats sont identiques à ceux indiqués pour l'entrelacement sans couplage magnétique.

Conclusion

Par rapport au hacheur unique, l'entrelacement de hacheurs couplés magnétiquement présente l'avantage de réduire sensiblement les contraintes du filtre d'entrée, de réduire également l'ondulation du courant dans la charge et de limiter l'ondulation du courant dans les hacheurs à l'aide d'une self, de valeur élevée sans doute, mais soumise uniquement à un flux alternatif (les deux enroulements de cette self créent des forces magnétomotrices, dues à la composante continue des deux courants I1 et I2, égales et directement opposées).

Entrelacement de plusieurs hacheurs sur un filtre d'entrée commun

Lorsqu'il est possible de subdiviser la charge en deux ou plusieurs unités identiques, on peut entrelacer deux ou plusieurs hacheurs distincts sur un filtre d'entrée commun (fig. 14).

Cette disposition est d'application aisée sur les véhicules de traction où la charge est presque toujours constituée de plusieurs moteurs qu'il est possible de subdiviser en deux ou plusieurs groupes alimentés en parallèle.

En ce qui concerne le dimensionnement du filtre d'entrée, ce système d'entrelacement bénéficie des mêmes avantages que ceux des deux montages précédents, à la condition toutefois que les différents hacheurs fonctionnent au même rapport cyclique et avec des courants de même amplitude.

La figure 14 donne, à titre d'exemple, l'évolution de la valeur efficace globale des harmoniques du courant I_{Le} pour deux hacheurs entrelacés fonctionnant à même rapport cyclique, mais avec des courants déséquilibrés en amplitude. Les formules données précédemment montrent que la valeur efficace des harmoniques du courant I_{Le} est proportionnelle au courant I_m et au carré du rapport ω_e / ω.

$$(I_{Le}) \text{ harm. eff. } = k\,(\delta, \alpha)\ \ I_m \left(\frac{\omega_e}{\omega}\right)^2$$

Le coefficient de proportionnalité k dépend du rapport cyclique δ et du facteur de déséquilibre α.

Plus le déséquilibre est grand, plus on perd l'avantage de l'entrelacement. A la limite, pour $\alpha = 1$, on se retrouve dans le cas d'une charge alimentée par un hacheur unique.

VI. CHOIX DU MODE DE COMMANDE DU HACHEUR

Nous avons exposé au chapitre II les divers modes de commande du hacheur :
— fréquence fixe de hachage et variation de la durée de conduction ;
— fréquence variable de hachage et durée de conduction constante ;
— variation simultanée de la fréquence et de la durée de conduction.

En traction électrique, le choix entre ces différentes techniques est guidé par deux critères principaux :
— d'une part les répercussions sur les équipements des installations fixes ;
— d'autre part, l'influence sur le dimensionnement du hacheur, notamment sur le circuit d'extinction, la self d'entrée et la self de lissage qui constituent les composants les plus pondéreux.

En général les utilisateurs préfèrent les hacheurs à fréquence(s) fixe(s) aux hacheurs à fréquence variable. Parmi les diverses raisons qui militent en faveur de ce choix, on peut dire que le fonctionnement à fréquence(s) fixe(s)
— permet une meilleure maîtrise des sollicitations engendrées par les hacheurs dans les équipements de signalisation, de télécommande ou de télécommunication, du fait de l'utilisation d'un nombre restreint de fréquences bien déterminées ;
— évite certains phénomènes de battement entre plusieurs véhicules équipés de hacheurs et circulant sur la même section de voie ;
— permet de réaliser un entrelacement de hacheurs s'il s'avère nécessaire de réduire les courants harmoniques circulant dans le système d'alimentation.

Quant au dimensionnement du hacheur, il est pratiquement aussi économique dans le premier que dans le troisième mode de commande, à condition d'utiliser dans le premier mode plusieurs fréquences fixes et non une seule. Dans ce cas, on procède à un ou plusieurs changements de fréquences en fonction du rapport cyclique.

Lorsqu'on ne craint pas de répercussions dans les équipements des installations fixes, les hacheurs commandés à fréquence variable et temps de conduction fixe présentent un grand intérêt du fait de leur simplicité. Dans ce second mode de commande en effet, on peut utiliser une structure de hacheur sans thyristor d'extinction, le temps de conduction étant fixé par la période propre du circuit oscillant (L, C).
Toutefois ce mode de commande ne s'adresse qu'à des hacheurs de faible puissance et qui ne demandent pas une plage de réglage trop importante. En pra-

tique, pour garder une puissance installée en circuit d'extinction et un rendement acceptables, on ne peut dépasser des puissances de l'ordre d'une ou deux centaines de kilowatts et un rapport cyclique maximal de 0,8.

Sur base de ces éléments, le hacheur à fréquence(s) fixe(s) sera généralement préféré au hacheur à fréquence variable dans les équipements destinés à la traction électrique. Sans être pénalisé du point de vue du dimensionnement, il facilite aux spécialistes des installations fixes la maîtrise des sollicitations engendrées dans les équipements à courant faible.

VII. LES HACHEURS EN FREINAGE ELECTRIQUE

Lors du freinage, l'énergie cinétique du véhicule est transformée en énergie électrique par les moteurs de traction fonctionnant en génératrices. En freinage rhéostatique cette énergie est transformée en chaleur dans des résistances installées à bord du véhicule, tandis qu'en freinage par récupération elle est renvoyée au réseau d'alimentation.

Jusqu'à ces derniers temps, le freinage rhéostatique était le plus répandu en traction en courant continu. Les réalisations de freinage par récupération se situaient principalement en « grande traction » où il s'agissait le plus souvent d'un freinage de retenue sur de longues pentes.
Ainsi donc, malgré son intérêt, le freinage par récupération était peu utilisé.

Les raisons de cette situation sont multiples.

La principale est que le moteur à excitation série — le plus répandu — est instable quand il fonctionne en génératrice sur le réseau. Dans ce cas il faut utiliser un moteur à excitation indépendante, qui reste cependant très sensible aux fluctuations du réseau.

Parmi les autres raisons, citons la difficulté de mise en œuvre de ce mode de freinage et le fait qu'il ne se maintient que jusqu'à une certaine vitesse (environ le tiers ou le quart de la vitesse maximale), en dessous de laquelle la force électromotrice de la génératrice devient inférieure à la tension d'alimentation. Dans les équipements traditionnels ce mode de freinage ne peut donc pas être utilisé comme frein d'arrêt.

Il a fallu attendre les hacheurs à thyristors pour donner son essor au freinage par récupération sur les engins à courant continu. Grâce à leur dynamique élevée, les hacheurs rendent possible le freinage par récupération, même avec des moteurs à excitation série et jusqu'à l'arrêt complet du véhicule. Toutefois, la plupart des sous-stations alimentant les réseaux à courant continu sont équipées de redresseurs à diodes et ne permettent pas le renvoi d'énergie vers le réseau alternatif. Dès lors, le freinage par récupération n'est possible que si l'énergie ainsi libérée est acceptée immédiatement par d'autres utilisateurs travaillant sur la même alimentation.

Cette condition n'étant pas toujours réalisée, le système le plus simple consiste à diminuer ou à éliminer le freinage électrique et à le remplacer par un freinage mécanique. Ce système ne nécessite pas de résistances de freinage à bord du véhicule, mais ne bénéficie pas entièrement des avantages du freinage électrique.
L'autre solution consiste à substituer instantanément et automatiquement un freinage rhéostatique au freinage par récupération : c'est le freinage mixte. Cette solution procure un freinage électrique total et permet la récupération d'énergie au prorata de la capacité d'absorption de la ligne d'alimentation.

Le freinage rhéostatique

Principe de fonctionnement (fig. 15)

Le moteur de type « à excitation série » est caractérisé par une self L_m et une résistance R_m.
La résistance de freinage R_f et un hacheur représenté par un interrupteur H sont branchés en parallèle sur le moteur fonctionnant en génératrice. L'interrupteur H, manœuvré à la fréquence $f = 1 / T$, reste fermé pendant un temps égal à δT, avec $0 \leqslant \delta \leqslant 1$.

Pendant la fermeture de l'interrupteur, la tension aux bornes de la résistance est nulle ; pendant son ouverture, elle est égale à $R_f \cdot I_m$.
La valeur moyenne de cette tension, sur une période de hachage, vaut donc

$$(U_{Rf}) \text{ moyen} = I_m \; R_f \; (1 - \delta)$$

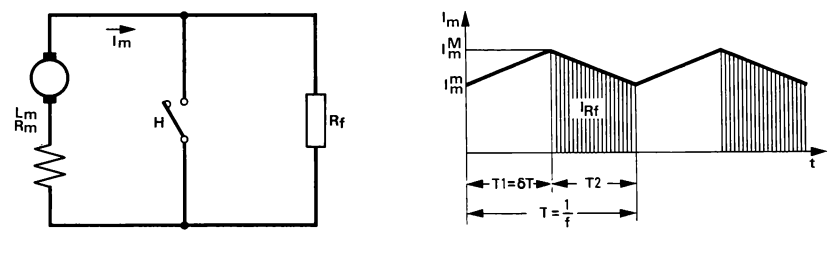


Fig. 15. - Schéma de fonctionnement d'un moteur série freiné rhéostatiquement avec intervention d'un hacheur H. Forme d'onde de courant ainsi obtenue.

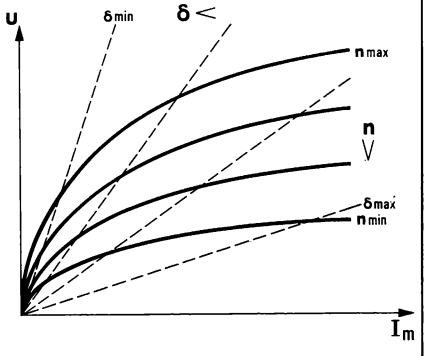


Fig. 16. - Courbes permettant de déterminer le point de fonctionnement d'un moteur en freinage rhéostatique.

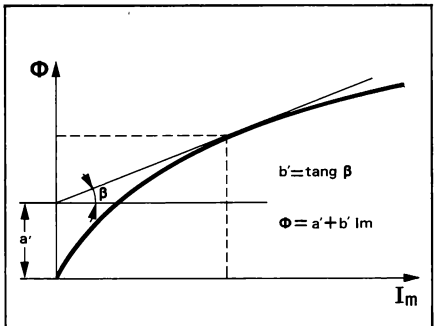


Fig. 17. - Relation entre le flux et le courant de la génératrice.

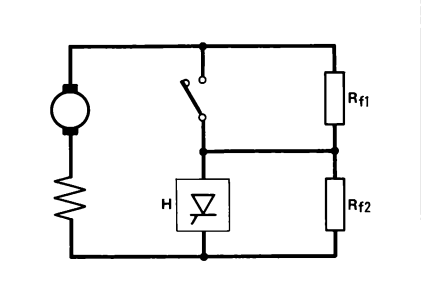


Fig. 18. - Schéma de principe d'un freinage rhéostatique réglé par hacheur H, avec résistance subdivisée en deux parties égales Rf1 et Rf2.

Pour autant que $L_m / R_f > T$, tout se passe comme si la génératrice débitait sur une résistance de valeur $R_f (1 - \delta)$. Ce dispositif permet donc de faire varier la valeur de la résistance équivalente du circuit d'une valeur nulle pour $\delta = 1$, à une valeur maximale égale à R_f pour $\delta = 0$.

Le point de fonctionnement du montage peut se déterminer à partir du réseau de courbes « tension-courant » du moteur et du réseau des droites de charge (fig. 16). Les courbes du moteur dérivent de la caractéristique magnétique de la machine et sont représentées avec la vitesse **n** comme paramètre. Pour les droites de charge, le paramètre est le rapport cyclique δ. Le point de fonctionnement se trouve à l'intersection des courbes de ces deux réseaux.

Critère de stabilité

A cause de la saturation de la machine, la relation entre le flux et le courant de la génératrice n'est pas linéaire. Dans un but de simplification des calculs, on peut linéariser cette relation au point de fonctionnement, de la manière représentée à la figure 17.

La force électromotrice développée par la génératrice étant proportionnelle au flux et à la vitesse peut donc s'écrire :

$$U \text{ gén} = k n \Phi = na + nb\, I_m$$

a et b étant des coefficients dépendant du type de moteur utilisé. L'évolution du courant I_m en fonction du temps est représentée à la figure 15 et est définie par les équations suivantes :

$$I_m = \frac{na}{R_m - nb}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) + I_m^m\, e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

pour

$$o \leqslant t \leqslant \delta T$$

$$I_m = \frac{na}{R_m + R_f - nb}\left[1 - e^{-\left(\frac{t-\delta T}{\tau_2}\right)}\right] + I_m^M \cdot e^{-\left(\frac{t-\delta T}{\tau_2}\right)}$$

pour

$$\delta T \leqslant t \leqslant T$$

avec

$$\tau_1 = \frac{L_m}{R_m - nb}$$

et

$$\tau_2 = \frac{L_m}{R_f + R_m - nb}$$

Pour obtenir un point de fonctionnement stable, il faut respecter les deux inégalités suivantes :

$$R_m < nb < R_f + R_m$$

Dans ce cas, le courant débité par la génératrice croît pendant la fermeture de l'interrupteur et décroît d'une même valeur durant l'ouverture de cet interrupteur.

Choix de la résistance de freinage

C'est le principal problème qui se pose pour le fonctionnement en freinage, car le choix de la fréquence de hachage résulte, comme pour le fonctionnement en traction, d'un compromis entre les impératifs du hacheur à thyristors et du moteur fonctionnant en génératrice. Dans la plupart des cas, l'ondulation du courant I_m devra être limitée au moyen d'une self de lissage.

Généralement, lors du freinage, on désire pouvoir régler le courant débité par la génératrice entre une valeur maximale (I_m) max et une valeur minimale $(1/\rho)$ (I_m) max (en pratique $1 \leqslant \rho \leqslant 5$), la vitesse pouvant atteindre une valeur maximale n max. La valeur de la résistance de freinage est alors déterminée pour permettre le débit du courant minimal à la plus grande vitesse :

$$R_f = \rho \frac{n \text{ max} \cdot a}{(I_m) \text{ max}} + n \text{ max } b$$

La tension aux bornes de la résistance de freinage et donc aux bornes du hacheur est maximale pour $I_m = (I_m)$ max :

$$(U_H) \text{ max} = (U_{Rf}) \text{ max}$$
$$= a\rho \cdot n \text{ max} + b \cdot n \text{ max } (I_m) \text{ max}$$

Le hacheur peut donc être soumis à une tension maximale beaucoup plus grande que la force électromotrice maximale de la génératrice, la différence entre ces deux tensions étant donnée par :

$$(U_H) \text{ max} - (U \text{ gén}) \text{ max}$$
$$= a \cdot n \text{ max} \cdot (\rho - 1)$$

Dans le cas d'une machine saturée, on obtient la relation très simple :

$$(U_H) \text{ max} = \rho (U \text{ gén}) \text{ max}$$

Pour réduire les sollicitations en tension et éviter un surdimensionnement trop important des thyristors du hacheur, diverses méthodes peuvent être utilisées. Certains procédés — par exemple la réduction de l'excitation de la machine aux grandes vitesses — entraînent une diminution du couple de freinage. D'autres ne modifient pas le couple de freinage : par exemple la subdivision de la résistance de freinage en deux parties égales (fig. 18). Dans ce cas, le hacheur à thyristors étant branché

en parallèle sur la moitié de la résistance de freinage, les sollicitations en tension seront réduites de moitié.

Schéma d'un hacheur à thyristors en freinage rhéostatique

Le schéma du hacheur et les principales formes d'ondes du montage sont donnés à la figure 19.

La mise en régime du freinage rhéostatique nécessite une séquence bien définie qui ne sera pas abordée dans cet exposé. Le fonctionnement est décrit en régime établi, l'évolution du courant I_m en fonction du temps étant représentée à la figure 15.

Au moment où on allume le thyristor principal Th1, le courant moteur est égal à I_m^m et le condensateur C est chargé à la tension $V_{Cf} = R_f \cdot I_m^m$. Dès cet instant, le courant moteur peut circuler dans le thyristor principal et croître durant le temps T1 = δT. D'autre part, en une alternance négative du courant I_L, le condensateur C voit sa polarité s'inverser de V_{Cf} à — V_{Cf} via L, D2 et Th1.

Quand le courant moteur atteint la valeur I_m^M à la fin de la période T1, on allume Th2 pour bloquer Th1. Jusqu'à l'instant $t = t1$, un courant I_L d'allure sinusoïdale circule dans le circuit constitué du condensateur C, de la self L, du thyristor Th2 et du dipôle Th1 en parallèle avec D1. A partir de $t = t1$, le courant I_L, partant de la valeur I_m — si on suppose que le courant moteur reste constant durant ce processus — commence une oscillation amortie dont l'allure dépend de la valeur de la résistance R_f. Si R_f est supérieur ou égal à $2\sqrt{L/C}$, le circuit est apériodique et I_L tend vers zéro, avec ou sans changement de signe. La tension aux bornes du condensateur C tend vers la valeur $R_f \cdot I_m^m$ suivant une loi apériodique. Pour $R_f < 2\sqrt{L/C}$ le courant I_L et la tension V_C suivent des lois périodiques amorties.

Pendant le temps T2 = (1 — δ) T, le courant moteur décroît, mais avec une variation, en fonction du temps, lente vis-à-vis de la période propre d'oscillation du circuit LC. La tension aux bornes du condensateur C suit dès lors quasiment sans retard, la tension aux bornes de R_f par l'intermédiaire de la diode D2. A la fin du temps T2, on retrouve le condensateur chargé à $R_f \cdot I_m^m$.

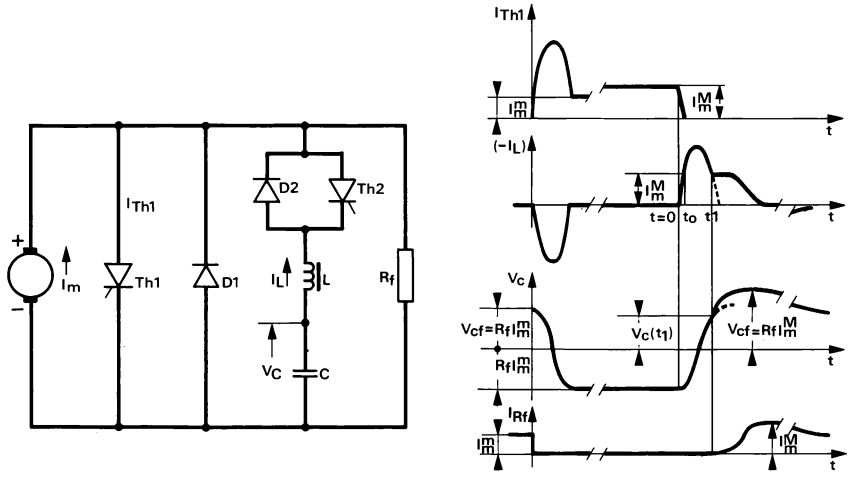


Fig. 19. - Schéma de principe d'un hacheur à thyristors fonctionnant en freinage rhéostatique. Formes d'ondes correspondantes.

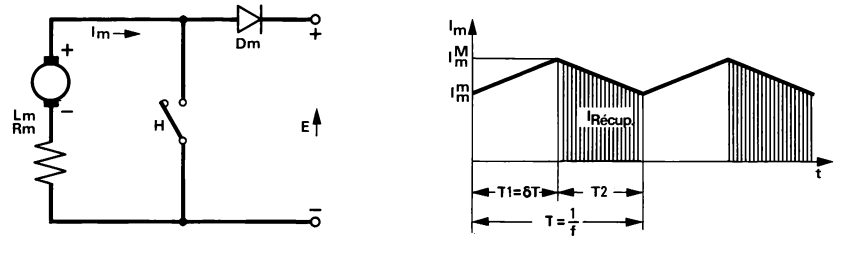


Fig. 20. - Principe de fonctionnement en freinage par récupération réglé par le hacheur H. Formes d'ondes correspondantes.

Le freinage par récupération

Principe de fonctionnement (fig. 20)

Le hacheur représenté par un interrupteur H est de nouveau branché en parallèle sur le moteur. La valeur moyenne de la

tension aux bornes du hacheur, sur une période de hachage, vaut

$$(U_H)\ \text{moy.} = E\ (1 - \delta).$$

Pour autant que le courant I_m présente peu d'ondulation, tout se passe, pour la génératrice, comme si elle débitait sur une résistance de valeur $(E / I_m)\ (1 - \delta)$. Pour $\delta = 1$, cette résistance équivalente est nulle ; pour $\delta = 0$, elle est maximale et a pour valeur E / I_m.

Le courant renvoyé à la ligne d'alimentation vaut zéro pendant la fermeture de l'interrupteur H et I_m durant l'ouverture de cet interrupteur ; sa valeur moyenne, sur une période de hachage, est donc $I_m\ (1 - \delta)$.

Critère de stabilité

En linéarisant comme précédemment la relation entre flux et courant de la génératrice, l'évolution du courant I_m est donnée par les équations suivantes :

$$I_m = \frac{na}{R_m - nb}\ (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + I_m^m\ e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

pour

$$0 \leqslant t \leqslant \delta t$$

et

$$I_m = \frac{na - E}{R_m - nb}\left[1 - e^{-\frac{t - \delta T}{\tau_1}}\right] + I_m^M\ e^{-\frac{t - \delta T}{\tau_1}}$$

pour

$$\delta T \leqslant t \leqslant T$$

avec

$$\tau_1 = \frac{L_m}{R_m - nb}$$

Pour obtenir un point de fonctionnement stable, on doit satisfaire aux inégalités :

$$R_m < nb$$

et

$$na + nb\ I_m^M < E + R_m\ I_m^M$$

Le premier membre de la seconde inégalité donne la valeur de la force électromotrice développée par la génératrice à la fin de l'intervalle $T1 = \delta T$. Il faut donc que cette tension soit inférieure à la tension de la ligne d'alimentation augmentée de la chute ohmique dans le moteur.

Lorsque le freinage s'effectue à grande vitesse, il est souvent impossible de satisfaire à la seconde inégalité, car la tension développée par le moteur est souvent beaucoup plus grande que la tension d'alimentation.

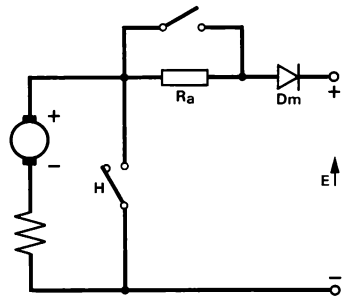


Fig. 21. - Principe du freinage par récupération avec résistance additionnelle R_a.

Deux moyens peuvent être utilisés pour conserver un fonctionnement stable au freinage par récupération : l'affaiblissement du champ des moteurs et l'insertion de résistances additionnelles.
L'affaiblissement du champ réduit la f.é.m. développée par le moteur, mais réduit aussi le couple de freinage ; par contre l'insertion d'une ou plusieurs résistances additionnelles — comme cela est représenté au schéma de la figure 21 — permet de garder les mêmes performances de freinage.

Généralement ces deux moyens sont utilisés simultanément à grande vitesse ; puis, à mesure que diminue la vitesse du véhicule, deux séquences peuvent être suivies : ou bien on « déshunte » les moteurs avant de court-circuiter les résistances additionnelles, ou bien on élimine tout d'abord les résistances avant de réaliser le déshuntage du moteur.
La première séquence qui élimine en dernier lieu les résistances additionnelles n'est guère favorable pour le taux de récupération ; par contre, elle permet de garder un couple énergique de freinage jusqu'à une vitesse élevée. Ce critère est souvent prépondérant lorsqu'il s'agit de véhicules ne circulant pas en « site propre ».
Toutefois dans la plupart des applications on attache une grande importance au taux de récupération qui conditionne en bonne partie la rentabilité du hacheur et l'on choisit évidemment la seconde séquence.

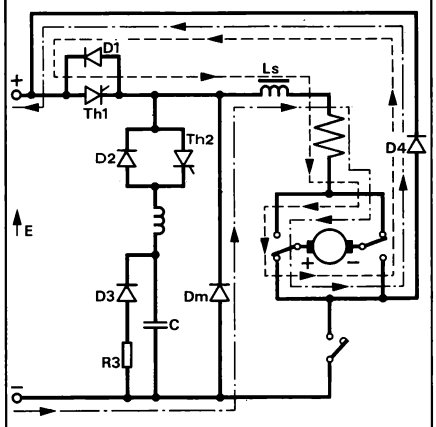


Fig. 22. - Circuits du courant moteur I_m s'établissant en cours de freinage par récupération réglé par le hacheur.
En traits interrompus : circuit réalisé pendant la conduction du thyristor principal ; en traits mixtes : pendant le blocage du thyristor principal.
Les contacteurs sont représentés en position de freinage.

Pour obtenir un taux de récupération élevé, il faut noter que la tension développée par le moteur lors du freinage doit dépasser le moins possible la tension du réseau d'alimentation, car l'excédent de tension doit être absorbé dans les résistances additionnelles, ce qui occasionne un gaspillage d'énergie.
Il convient donc de choisir des moteurs à vitesse de définition élevée, ce qui permettra lors du freinage de limiter la tension à leurs bornes à une valeur aussi proche que possible de la tension d'alimentation.
Avec un équipement traditionnel, un tel relèvement de la vitesse de définition entraînerait une dépense d'énergie inadmissible dans le rhéostat de démarrage, ce qui n'est évidemment pas le cas avec des équipements à thyristors.

Schéma d'un hacheur à thyristors pour freinage par récupération

Le schéma de la figure 22 montre le changement de couplage à effectuer pour passer de la position « traction » à la position « freinage par récupération » avec un hacheur à thyristors. Lors du freinage, les processus d'allumage et d'extinction des thyristors sont tout à fait identiques à ceux qui ont été décrits pour le fonctionnement en traction.

L'énergie du moteur a été convertie en énergie électrique et transmise aux selfs L_s et L_m qui constituent un réservoir d'énergie d'où sont prélevées vers la ligne d'alimen-

tation, des quantités d'énergie d'autant plus grandes que l'instant d'allumage de Th2 est plus éloigné dans le temps de celui de Th1.
En supposant que l'amorçage de Th1 se fasse à fréquence constante, c'est donc la phase des impulsions d'amorçage de Th2 qui règle l'intensité moyenne du courant moteur et, par conséquent, celle du couple de freinage.

Le freinage mixte

Le schéma du montage et les principales formes d'ondes qui s'y rapportent sont donnés à la figure 23. Par rapport au schéma utilisé pour le freinage par récupération, le schéma établi pour le freinage mixte comporte un dipôle supplémentaire en parallèle sur le thyristor principal. Ce dipôle est constitué de la résistance de freinage R_f en série avec le thyristor Th3.
Pour réaliser le freinage *uniquement par récupération* on ne commande pas le thyristor Th3. En examinant l'allure des différentes courbes à partir du moment où l'on allume le thyristor Th2, on retrouve à la figure 23 le processus bien connu de l'extinction du thyristor Th1 décrit à la figure 4. Le courant de ligne I_o a pris la valeur $-I_m$ au temps $t1$ et la conserve jusqu'à l'allumage du thyristor principal à l'instant $t5$. Le moteur fonctionne en génératrice et renvoie de l'énergie à la ligne d'alimentation.
Pour réaliser le freinage *mixte* on allume le thyristor Th3 à un temps t_r réglable, intermédiaire entre les temps d'allumage des thyristors Th2 et Th1. Avant l'allumage de Th3 le montage fonctionne en freinage par récupération. A l'instant t_r, le courant I_m se referme sur la résistance R_f et le thyristor Th3, au lieu d'être renvoyé vers la ligne et il se produit dans cette résistance une transformation d'énergie en chaleur. Si la tension $R_f \cdot I_m$ reste inférieure à celle de la ligne d'alimentation, le courant I_o s'annule. Le courant I_{Rf} continue à circuler jusqu'à l'amorçage de Th1 au temps $t5$; à ce moment le thyristor Th1 conduit le courant moteur I_m et le courant I_{Rf} s'annule. L'énergie dissipée dans la résistance R_f sera d'autant plus grande que l'amorçage de Th3 suivra de près celui de Th2. Dans le cas où la ligne n'admet aucune récupération d'énergie, l'allumage de Th3 est provoqué dès que le processus d'extinction de Th1 par Th2 est terminé.
Le réglage de la phase des impulsions de Th3 permet donc de réaliser un dosage entre les deux modes de freinage, tandis que le réglage de la phase des impulsions de Th2 agit sur la valeur du courant moteur, c'est-à-dire sur le couple de freinage.

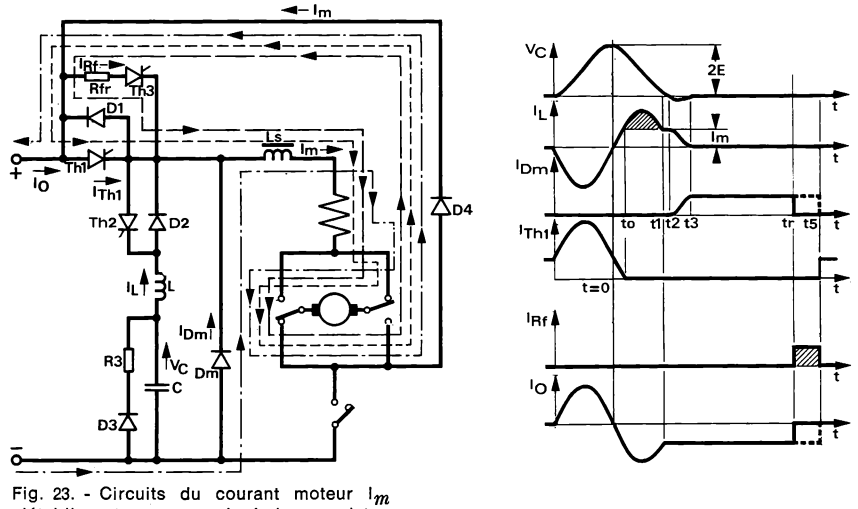


Fig. 23. - Circuits du courant moteur I_m s'établissant en cours de freinage mixte commandé par hacheur.
En traits interrompus courts : circuit réalisé pendant la conduction du thyristor principal.
En traits interrompus longs : pendant le blocage du thyistor principal et freinage rhéostatique.
En traits mixtes : pendant le blocage du thyristor principal et freinage par récupération.
Les contacteurs sont représentés en position freinage.

VIII. COMMANDE ELECTRONIQUE DES HACHEURS

Principe

On désire, par l'intermédiaire du hacheur, imposer à la charge une consigne de courant à atteindre le plus rapidement possible, sans variation brutale ni dépassement, quelle que soit la tension moyenne aux bornes de la charge.

De plus, on souhaite conserver le contrôle du hacheur, quelles que soient les perturbations extérieures.

Par conséquent le dispositif électronique du hacheur doit établir un dialogue continu avec tous les périphériques
— pour recevoir des informations et en donner aux équipements conventionnels, tels que les pédaliers, manipulateurs, claviers, relais, etc.;
— pour contrôler le courant de la charge à l'aide d'un régulateur analogique complété d'un système logique séquentiel de sécurité;
— pour construire des variables de verrouillage à partir des mesures de tensions et de courants.

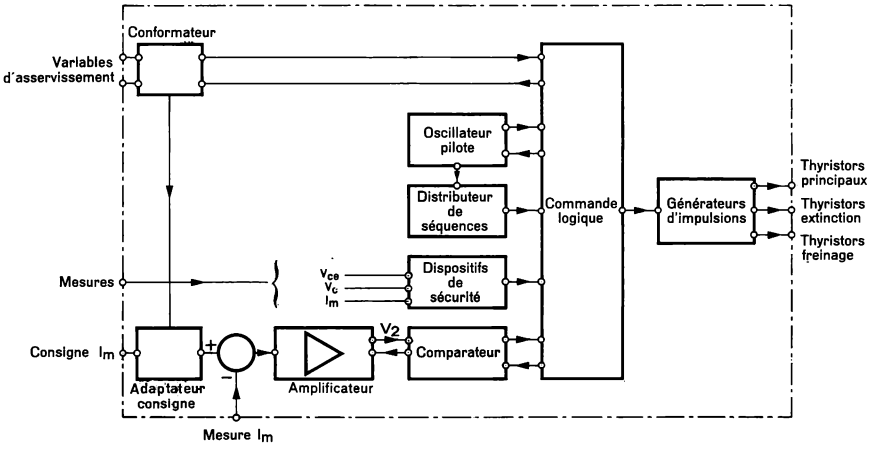


Fig. 24. - Schéma-bloc de la commande électronique du hacheur à thyristor.

Description (fig. 24)

1. Le conformateur

Le conformateur tient compte d'un certain nombre d'informations émanant d'équipements qui ne sont pas liés directement au hacheur, mais qui constituent avec lui un ensemble.

- Le mécanicien commande l'engin de traction à partir, par exemple, d'un manipulateur à plusieurs positions ou encore d'un pédalier à une ou plusieurs pédales. A partir de ces éléments il faut
— construire une variable de décision « marche-arrêt »;
— discriminer une consigne de traction d'une consigne de freinage et imposer une séquence qui permette au hacheur de passer avec sécurité d'un mode de fonctionnement à l'autre;
— construire la consigne de courant à fournir au hacheur après l'avoir éventuellement conformée à certains impératifs d'exploitation (charge des voitures par exemple).

- Par l'intermédiaire du conformateur, tout dispositif de décel de patinage peut agir avec rapidité sur la consigne de courant de façon appropriée afin d'enrayer le patinage amorcé. Cet enrayage peut se faire, par exemple, par réduction plus ou moins prononcée de la consigne de courant.

- Lorsque la charge est un moteur à excitation série, l'opération de shuntage s'effectue pas à pas, par crans successifs. Les décisions de shuntage prises par le système électronique sont transmises aux organes de shuntage par le conformateur.

2. L'oscillateur pilote et le distributeur de séquences (fig. 25)

L'horloge-mère est soit un oscillateur magnétique qui travaille à une fréquence proportionnelle à sa tension d'alimentation, soit un oscillateur à quartz.

On construit une série d'impulsions $\overline{I_i}$ de durée bien déterminée, synchronisées sur le signal de sortie $\overline{H}$ de l'horloge-mère.

On construit aussi un signal en dents de scie **r** en phase avec l'impulsion $\overline{I_1}$. Le rôle des différentes impulsions et des signaux dérivés sera explicité dans les paragraphes suivants.

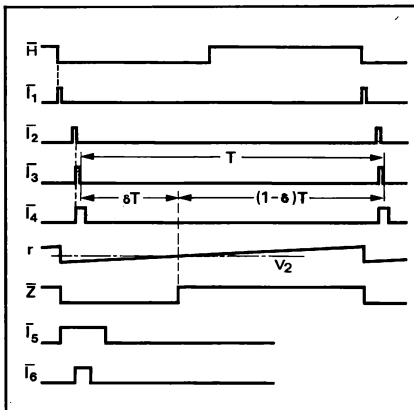


Fig. 25. - Schéma séquentiel des impulsions.

3. La régulation

La boucle de régulation est schématisée à la figure 26.
Le signal V_2 de sortie de l'amplificateur de calcul est comparé au signal en dents de scie **r**. Le thyristor d'extinction est allumé sur le flanc montant de la dent de scie au moment où l'amplitude de celle-ci atteint celle du signal V_2.

Le régulateur proportionnel intégral

Après avoir étudié différentes boucles de régulation où l'on utilise notamment un régulateur proportionnel, proportionnel avec constante de temps et intégrateur

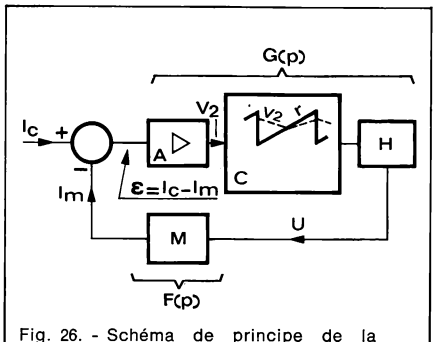


Fig. 26. - Schéma de principe de la boucle de régulation.
A : amplificateur de calcul
C : comparateur
H : hacheur
M : moteur.

pur, il est apparu que le régulateur à actions proportionnelle et intégrale s'adaptait le mieux à la commande du hacheur.

Le fonctionnement du moteur série est régi par l'équation :

$$RI_m + L\frac{dI_m}{dt} = U - E = U - kNI_m$$

On pose

$$R' = R + kN \quad \text{et} \quad \tau_m = \frac{L}{R'}$$

La fonction de transfert $F(p)$ s'écrit

$$F(p) = \frac{RI_m}{U} = \frac{R}{R'}\,\frac{1}{1 + p\tau_m}$$

Il vient également

$$\frac{U}{R} = (I_c - I_m)\,G(p)$$

Il faut choisir $G(p)$ de telle sorte que la boucle soit stable tout en répondant le plus vite possible. On satisfait le mieux à cette condition en prenant

$$G(p) = \frac{1 + p\tau_1}{p\tau_2}$$

(régulateur proportionnel intégral) et en choisissant judicieusement τ_1 et τ_2.

La stabilité de la boucle définie par

$$F(p)\,G(p) = \frac{R}{R'}\,\frac{1}{1 + p\tau_m}\,\frac{1 + p\tau_1}{p\tau_2}$$

est la plus critique pour $R' = R$, soit $N = 0$.

Pour stabiliser la boucle il suffit de choisir $\tau_1 = L / R$; pour accélérer la réponse, il faut choisir τ_2 le plus petit possible.
Comme on peut écrire

$$G(p) = \frac{1 + p\tau_1}{p\tau_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2}\left(1 + \frac{1}{p\tau_1}\right)$$

prendre τ_2 le plus petit possible revient à choisir aussi grand que possible le coefficient K d'action proportionnelle de l'amplificateur ($K = \tau_1 / \tau_2$).

On va voir que l'on est limité dans cette voie par deux considérations : d'une part, éviter le fonctionnement en sous-harmonique ; d'autre part, limiter la résistance négative présentée par le hacheur muni de sa boucle de régulation en courant.

Condition de non-fonctionnement en sous-harmonique

Lorsqu'on régule le courant de crête du moteur à chaque période de hachage, on ne risque pas le fonctionnement du hacheur en sous-harmonique quand $\delta < 0{,}5$. Par contre, pour $\delta \geqslant 0{,}5$, on peut imaginer, bien que le hacheur commute à fréquence fixe $f = 1 / T$, une modulation à plus basse fréquence du courant moteur. La figure 27 donne un exemple de fonctionnement en sous-harmonique de période 2T. Il ne faut pas oublier que le fait d'imposer une valeur de crête que l'on espère atteindre dans la période T, ne supprime pas l'action de la butée maximale.

On voit que le risque d'un fonctionnement anormal de la boucle en sous-harmonique est d'autant plus grand que l'ondulation sur V_2 est élevée, c'est-à-dire
— que le taux d'ondulation du courant moteur est important ;
— que le coefficient K d'action proportionnelle de l'amplificateur est grand.

Pour éviter le fonctionnement en sous-harmonique, il faut donc faire en sorte que le produit du taux d'ondulation par le facteur K reste inférieur à une certaine valeur.

Comportement du hacheur en résistance négative

En nous référant au schéma de la figure 28 où l'on suppose que l'on régule le courant de crête du moteur par un régulateur à action proportionnelle pure, nous voyons qu'à toute perturbation de V_{Ce} va correspondre une diminution de I_H ; toute perturbation sur E va dès lors se retrouver amplifiée et entretenue sur V_{Ce}. Le système est instable et va osciller.

Pour limiter à des valeurs raisonnables la durée et l'amplitude des oscillations du filtre d'entrée L_eC_e soumis à des variations brutales, soit de tension et de courant du réseau (démarrage et arrêt d'autres trains sur la même ligne), soit de courant dans le hacheur (arrêt brutal du hacheur ou changement de fréquence de hachage), il faut
— soit amortir la cellule (L_e, C_e) en réalisant C_e en deux parties, dont l'une est câblée en série avec une résistance d'amortissement ρ de valeur appropriée (fig. 29) ;
— soit limiter la valeur du coefficient K d'action proportionnelle de l'amplificateur.
En pratique on conjugue généralement l'action de ces deux moyens.

4. Dispositifs de sécurité

Outre la boucle de régulation du courant de la charge étudiée au paragraphe précédent, sont incorporés à la commande générale du hacheur des dispositifs électroniques de sécurité qui, via des variables de verrouillage, arrêtent le hacheur lorsque celui-ci est soumis à des perturbations anormales venant de l'extérieur.

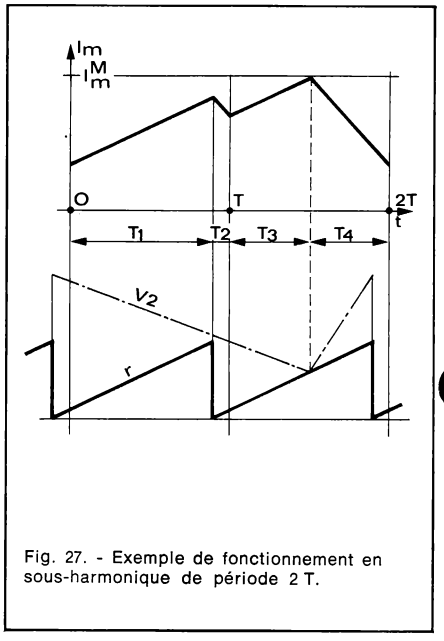


Fig. 27. - Exemple de fonctionnement en sous-harmonique de période 2 T.

• Le convertisseur statique de courant continu est caractérisé par le courant maximal, proportionnel à $V_{Ce}\sqrt{C / L}$, qu'il peut éteindre.
Pour conserver avec sécurité le contrôle du hacheur, il est donc indispensable de surveiller en permanence le courant instantané de la charge.

— Dans la zone délimitée par les deux butées de tension minimale et maximale d'alimentation, on se prémunit contre les variations trop brutales de tension sur C_e et contre toute charge intempestive du condensateur C du circuit oscillant d'extinction.
— On prévoit également une parfaite protection du hacheur contre les courts-circuits dans la charge.

• Un dispositif de surveillance compare en permanence l'équilibrage des tensions reprises par les thyristors ou les diodes lorsque plusieurs semi-conducteurs sont câblés en série.

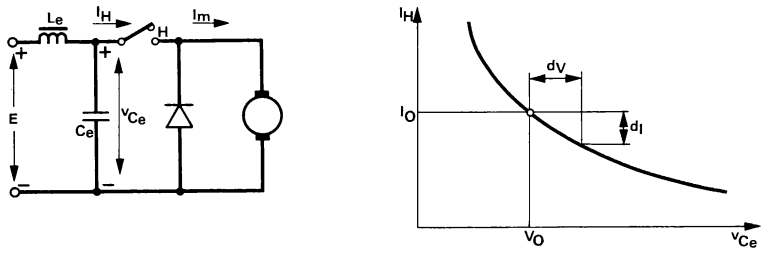


Fig. 28. - Fonctionnement du hacheur en résistance négative.

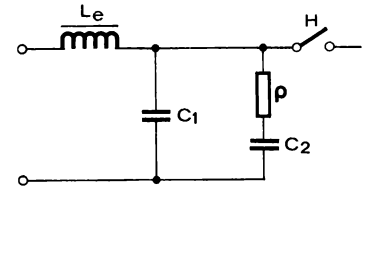


Fig. 29. - Insertion de la résistance d'amortissement ρ dans le circuit des capacités C_1 et C_2.

• Un autre dispositif de sécurité surveille l'alimentation du ventilateur qui souffle l'air de refroidissement sur les semi-conducteurs.

• Le bon fonctionnement du hacheur est tributaire du fonctionnement correct de l'électronique, laquelle doit être alimentée avec sécurité. A cet effet une variable de verrouillage avertit l'électronique de commande d'un défaut survenant dans l'électronique d'alimentation et provoque l'arrêt du hacheur.

5. Commande logique

La commande logique des thyristors est organisée par le distributeur de séquences (fig. 25).

Les thyristors principaux sont allumés lors de la retombée à zéro de la variable $\overline{T_3}$, c'est-à-dire toujours à un instant fixe dans la période de l'horloge-mère.
La variable logique $\overline{Z}$ s'enclenche lorsque la tension de sortie V_2 de l'amplificateur A (fig. 26) devient inférieure au signal en dents de scie **r**. En faisant varier V_2, on modifie donc l'instant d'enclenchement de la variable $\overline{Z}$ dans la période.

Les thyristors d'extinction sont allumés à chaque enclenchement de la variable $\overline{Z}$ pour autant que l'on se trouve en dehors, d'une part de la butée du rapport cyclique minimal constitué par $\overline{T_4}$ et d'autre part, de la butée du rapport cyclique maximal constituée par $\overline{T_1}$.

S'il a été prévu, le changement de fréquence sera décidé et réalisé pendant la durée de l'impulsion $\overline{T_1}$. L'impulsion $\overline{T_5}$ fixe la valeur du rapport cyclique δ pour laquelle on augmente la fréquence de hachage; $\overline{T_6}$ fixe la valeur de δ pour laquelle on réduit la fréquence.
Un bistable d'arrêt a pour but de demander l'arrêt du hacheur, en empêchant toute commande des thyristors lors de l'enclenchement de certaines variables de verrouillage. On prévoit un certain laps de temps — la durée de l'impulsion $\overline{T_2}$ — pendant lequel, suite à l'enclenchement d'une des variables de verrouillage, on va décider d'enclencher ou de déclencher le bistable d'arrêt. Dans la séquence des opérations, l'impulsion $\overline{T_2}$ se présente avant la décision de commande des thyristors principaux. L'enclenchement du bistable d'arrêt inhibe les variables logiques de commande des générateurs d'impulsions.

6. Les générateurs d'impulsions

Les impulsions de commande des grilles des thyristors sont fournies par des oscillateurs bloqués, commandés à partir d'un circuit logique d'entrée à une variable. L'oscillateur fournit son impulsion lors de la retombée à zéro de la variable logique de son circuit d'entrée.
L'impulsion suivante ne peut prendre naissance que pour autant que la variable d'entrée, après avoir repris momentanément l'état 1, retombe de nouveau à zéro.

Un seul oscillateur est prévu par fonction thyristorisée; il fournit une impulsion de faible puissance, repérée par rapport à la masse de l'électronique. Cette impulsion est ensuite amplifiée et multipliée pour atteindre chaque thyristor du circuit de puissance via un transformateur. Ce transformateur, isolé parfois à 15 000 volts en traction ferroviaire, fournit une impulsion de courant brève (100 à 300 μs), à flanc raide ($\leqslant 1$ μs) et d'amplitude élevée (3 ampères).

7. L'alimentation électronique

L'équipement électronique de commande du hacheur est alimenté sous un ensemble de tensions stabilisées ($\pm$ 15 volts et $\pm$ 24 volts) repérées par rapport à une borne de masse complètement isolée du reste de l'équipement.
Dans un boîtier réservé à l'alimentation de l'électronique, on construit, partant de la source à tension continue, un dispositif de commande d'un onduleur à transistors. Cet onduleur, alimenté directement par la tension variable de la source, élabore au travers d'un transformateur les alimentations stabilisées de puissance $\pm$ 24 volts pour les bobines des relais, le générateur des transducteurs et les amplificateurs de puissance fournissant les impulsions de commande des thyristors. A partir des $\pm$ 24 volts et à l'aide de diodes de Zener on construit les alimentations stabilisées $\pm$ 15 volts des amplificateurs de calcul et des circuits logiques.

RÉFÉRENCES

ACEC a été un pionnier dans la technique du hacheur, en décidant, dès 1965, d'étudier et de construire un prototype destiné à équiper une automotrice à 3 kV mise à sa disposition par la SNCB.

Le succès de cette expérience fut tel que la SNCB a définitivement opté pour le hacheur et l'impose depuis 1970 pour l'entièreté de son nouveau matériel moteur.

ACEC a parallèlement développé des hacheurs pour les réseaux à 600 et 750 V. Au total, ACEC a ainsi, à l'heure actuelle, construit ou reçu en commande 352 équipements à hacheurs, ce qui le place à la tête des constructeurs de ce type de matériel.
Le détail de ces références est donné ci-dessous:

Automotrices doubles, 3 kV cc

Puissance des hacheurs: 1 200 kW.
Client: SNCB
Hacheurs fournis pour les voitures suivantes:
1 automotrice prototype (mise en service en 1969);
12 automotrices type 1970 (mise en service en 1970-1971);
30 automotrices type 1973 (mise en service en 1973);
24 automotrices type 1974 (mise en service en 1974);
1 automotrice à freinage par récupération (mise en service en 1975).

Automotrices triples, 3 kV cc

Puissance des hacheurs: 2 x 1 200 kW, à freinage par récupération et contrôle de vitesse.
Client: FEPASA, São Paulo, Brésil.
50 automotrices en commande en 1976.

Automotrices quadruples, 3 kV cc

Puissance des hacheurs: 2 x 1 200 kW.
Client: SNCB.
20 automotrices mises en service en 1975-1976;
12 automotrices en commande (tranche 1977).

Locomotives 3 kV cc (7 000 ch)

Puissance des hacheurs: 5 700 kW.
Client: SNCB.
15 locomotives (mise en service en 1975-1976);
10 locomotives en commande (tranche 1977).

Métros 750 V cc

Puissance des hacheurs: 640 kW, à freinage rhéostatique par récupération.
Client: STIB, Bruxelles.
45 unités de traction de deux voitures.
Inauguration en septembre 1976.

Tramways 630 V cc

Puissance du hacheur: 315 kW, à freinage rhéostatique par récupération.
Client: HMT, La Haye, Pays-Bas.
Equipement de cinq voitures PCC (mise en service en 1973).

CONCLUSION

La technique de l'utilisation des thyristors pour régler la valeur d'une tension continue dans les équipements de traction n'a plus à faire les preuves.
Ses avantages indiscutables sont bien connus; nous retiendrons notamment: l'économie d'énergie, spécialement appréciable pour des véhicules à démarrages fréquents (métro, tramways, trains en service omnibus), l'application progressive de l'effort de traction, la diminution des frais d'entretien, la souplesse de conduite et de fonctionnement.

J. GOUTHIÈRE

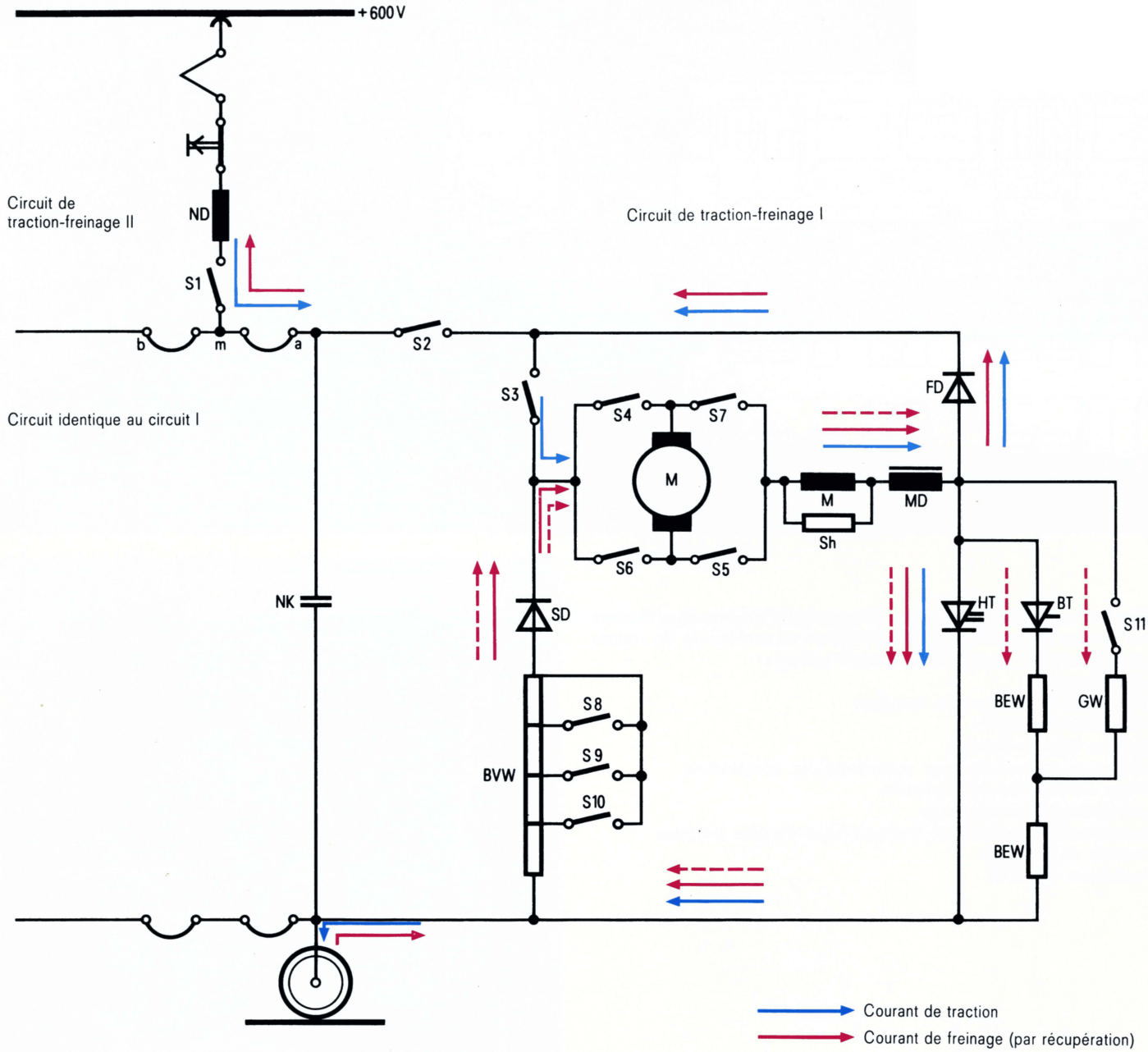


Schéma de principe du circuit principal

Hacheur à thyristor

S1	Contacteur de ligne
S2	Contacteur sectionneur de ligne
S3	Contacteur de traction
S4-S7	Contacteurs principaux
S8-S10	Contacteurs d'élimination des résistances additionnelles de freinage
S11	Contacteur de freinage d'urgence
HT	Thyristors principaux
BT	Thyristors de freinage
FD	Diode de roue libre
SD	Diode de blocage
Sh	Shunt permanent
MD	Self de moteur
ND	Condensateur de ligne
BEW	Résistances de freinage rhéostatique
BVW	Résistances additionnelles de freinage
GW	Résistance de freinage d'urgence